

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION THÉORIQUE DE LA CINÉTIQUE D'INFILTRATION DES
LIQUIDES NON-RÉACTIFS DANS LES BÉTONS RÉFRACTAIRES

CHRISTOPHE GAUBERT

DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉTALLURGIQUE)

FÉVRIER 2003



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-81548-X

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

**MODÉLISATION THÉORIQUE DE LA CINÉTIQUE D'INFILTRATION DES
LIQUIDES NON-RÉACTIFS DANS LES BÉTONS RÉFRACTAIRES**

présenté par : GAUBERT Christophe

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès Sciences Appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. RIGAUD Michel, D.Sc.A., président

M. ALLAIRE Claude, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. AJERSCH Frank, Ph.D., membre

Nomen est numen.

(Citation latine :

Nommer, c'est connaître.)

REMERCIEMENTS

Merci tout d'abord à Claude Allaire, mon directeur de recherche, qui m'a fait découvrir cette passion nourrissant la recherche scientifique, faite de curiosité et de créativité... Merci aussi pour la confiance et le soutien qu'il m'a accordés dès le début de ma maîtrise. J'ai beaucoup apprécié mon autonomie de recherche, ce qui m'a permis d'acquérir de nombreuses connaissances dans des domaines connexes.

Je tiens également à remercier Michel Rigaud, directeur du CIREP, qui a été le premier à m'accueillir dans le groupe de recherche, lorsque je suis arrivé en tant que stagiaire. Mon travail n'aurait cependant pas été le même sans l'expérience de Saied Afshar, la verve passionnée de Roger Pelletier et le pragmatisme de Jean-Philippe Bouchard.

Enfin un grand merci à tous ceux qui ont rendu mon séjour au CIREP agréable : Huguette Rioux, Emmanuel Divry, Nicodème Ntakaburimvo, Yves Vermeulen, Émilie Herny, Émilie Dajoux, Yassine Douche, Vincent Ébacher et tous les autres... Bon courage à Émilie Herny, dont le projet de recherche va davantage enrichir les connaissances sur l'infiltration des réfractaires par l'aluminium liquide ! Et une pensée toute particulière à Elizabeth pour son soutien affectif, pour chaque jour qui passe...

RÉSUMÉ

Les mécanismes de dégradation des matériaux réfractaires par l'aluminium liquide sont très complexes et souvent liés entre eux. Ainsi, l'infiltration du métal fondu dans la structure poreuse des réfractaires va contribuer à une plus grande corrosion, mais aussi à un affaiblissement des propriétés thermomécaniques. Il s'agit donc d'un phénomène important et pourtant peu connu de manière théorique. L'objectif de ce projet est de davantage connaître la cinétique d'infiltration d'un liquide non-réactif dans un béton réfractaire. Il est certain que les réactions chimiques et les gradients thermiques modifient sensiblement la cinétique d'infiltration, mais l'ensemble est trop complexe pour une approche unique.

L'approche classique de l'infiltration dans les réfractaires passe par la modélisation de la structure poreuse en capillaires cylindriques. Une première loi cinétique est développée en faisant appel aux principaux paramètres physiques : la mouillabilité et la viscosité du liquide infiltrant. Cette loi est de type quadratique, mais lorsque l'on prend en compte la gravité et la pression métallostatique, elle prend la forme d'une loi semi-logarithmique, plus générale. Plus le terme correspondant à la gravité est important, plus la loi semi-logarithmique va s'éloigner de la loi quadratique.

Cependant, la structure poreuse des bétons réfractaires apparaît être beaucoup plus complexe qu'un simple ensemble de capillaires. Les travaux de caractérisation ont montré que des paramètres tels que la quantité de ciment, la présence de défloculant et la granulométrie peuvent faire varier de manière importante les caractéristiques de la structure poreuse (volume relatif ou porosité, taille des pores, surface offerte par la structure, etc.). À partir des observations microscopiques, on a constaté que les pores peuvent revêtir trois formes différentes : bulles de coulage, porosité intergranulaire et

porosité matricielle. Seule la porosité matricielle, à base de capillaires, va contribuer réellement à l'infiltration d'un liquide.

Les essais d'infiltrations ont tous eu lieu à température ambiante, par l'intermédiaire de deux liquides différents (une solution aqueuse de bleu de méthylène et une huile). Les essais étaient bidirectionnels, à la fois ascendants et descendants, afin de déterminer l'influence de la gravité. L'hétérogénéité des matériaux réfractaires s'est manifestée, pour l'infiltration, à deux niveaux : le niveau microstructurel (effet d'échelle) et le niveau macrostructurel (effet de peau). Le lissage de courbe non-linéaire a permis d'exploiter facilement les résultats. La loi semi-logarithmique proposée s'est révélée être meilleure que la simple loi quadratique pour modéliser au mieux l'infiltration d'un liquide non-réactif dans la structure poreuse d'un béton réfractaire. Toutefois, les résultats ont montré des tailles équivalentes de pores très petites, ce qui est probablement le reflet d'une certaine hétérogénéité de la structure poreuse. De plus, même si la gravité semble négligeable dans le processus d'infiltration, le terme correspondant montre des valeurs très élevées.

Une explication possible à cette surestimation est venue lors de la mise en réseau du modèle de cinétique d'infiltration. La structure poreuse n'est plus alors représentée par un ensemble d'éléments séparés, mais par un continuum statistique. Le réseau est défini par un certain degré de connectivité et par une distribution en taille de pore. On a développé un programme informatique pour simuler le fonctionnement de ce nouveau modèle en se basant sur un automate cellulaire semi-stochastique à deux dimensions. Les essais ont montré que le terme de gravité augmente avec la connectivité du réseau, ce qui représenterait un « étalement » du liquide dans la structure poreuse. Il apparaît alors une analogie entre la connectivité et la tortuosité. On a cependant noté que la distribution de taille de pore n'a d'effet sensible que pour une distribution relativement étroite.

Ce modèle a permis de mieux comprendre les mécanismes d'infiltration et de mieux maîtriser les tendances selon les paramètres caractéristiques. Il reste cependant limité par le caractère hétérogène des matériaux réfractaires.

ABSTRACT

The degradation mechanisms of the refractory materials by molten aluminum are very complex and often linked between them. Hence the molten metal penetration into the porous structure of the refractories will contribute to a greater corrosion, but also to a weakness of the thermomechanical properties. It is then an important phenomenon, not well understood in a theoretical way. The goal of this project is to better understand the penetration kinetics of a non-reactive liquid into a refractory castable.

The classical approach of the penetration into the refractories goes through the modeling of the porous structure in cylindrical capillaries. A first kinetic law is developed with the mean of the main physical parameters : the wettability and the viscosity of the infiltrating liquid. This law is quadratic, but if the gravity and the metallostatic pressure are taken into account, it becomes semi-logarithmic and more general. More important the gravity term, more different it is from the quadratic law.

However, the porous structure of the refractory castables appears to be more complex than a simple capillaries set. The characterization work has shown that parameters like the cement quantity, the presence of defloculant and the grains size can change a lot the features of the porous structure (relative volume or porosity, pores size, porous surface, etc.). From microscopic observations, it is possible to distinguish three types of pores : casting bubbles, intergranular porosity and matricial porosity. Only the matricial porosity, based on capillaries, will contribute really to a liquid penetration.

All the penetration tests occurred at room temperature, with two different liquids (an aqueous solution of methylene blue and an oil). The tests were bidirectional, upwards and downwards, in order to determine the influence of gravity. The inhomogeneity of the refractory materials was revealed at two levels : the microscopic

level (scale effect) and the macroscopic effect (peel effect). The non-linear curve fitting allowed to analyze easily the results. The suggested semi-logarithmic law appeared to be better than the simple quadratic law, in order to modelize a non-reactive liquid penetration into the porous structure of a refractory castable. Moreover, even if the gravity seems to be negligible in the penetration process, the corresponding term shows very high values.

A possible explanation to this overestimation has come with the penetration kinetics model networking. The porous structure is not represented anymore by a separate elements set, but by a statistic continuum. The network is defined by a certain degree of connectivity and by a pore size distribution. A computer program was developed to simulate the working of this new model based on a two-dimensional semi-stochastic cellular automaton. The tests have shown that the gravity term increases with the network connectivity, representing a “spreading” of the liquid in the porous structure. An analogy appears then between connectivity and tortuosity. However, the pore size distribution has a sensible effect only for a narrow distribution.

This model allowed to better understand the penetration mechanisms and to better control the trends according to the characteristic parameters. Nevertheless, it is still limited by the inhomogeneous character of the refractory materials.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	IV
REMERCIEMENTS.....	V
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT	IX
TABLE DES MATIÈRES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XIV
LISTE DES FIGURES.....	XV
LISTE DES ANNEXES	XVIII
1. INTRODUCTION.....	1
2. GÉNÉRALITÉS.....	3

2.1. MÉCANISMES DE CORROSION DES ALUMINO-SILICATES PAR L'ALUMINIUM LIQUIDE	4
2.1.1. CAS DE L'ALUMINIUM PUR	4
2.1.2. CAS DES ALLIAGES D'ALUMINIUM	10
2.2. CONCLUSION DE LA SECTION 2.....	15
 3. LES PARAMÈTRES CONTRÔLANT LA CINÉTIQUE D'INFILTRATION	 17
3.1. MOUILLABILITÉ ET LOI DE CAPILLARITÉ.....	17
3.1.1. APERÇU DE L'APPROCHE THERMODYNAMIQUE	18
3.1.2. APPLICATION MACROSCOPIQUE : LA LOI DE CAPILLARITÉ	23
3.2. INFLUENCE DE LA VISCOSITÉ ET DE LA PRESSION MÉTALLOSTATIQUE	29
3.2.1. L'ÉCOULEMENT VISQUEUX	29
3.2.2. CINÉTIQUE DE PÉNÉTRATION D'UN TUBE CAPILLAIRE	36
3.3. CONCLUSION DE LA SECTION 3.....	47
 4. CARACTÉRISATION DES SYSTÈMES EN PRÉSENCE	 49
4.1. LES MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES	49
4.1.1. COMPOSITION CHIMIQUE.....	49
4.1.2. DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE.....	53
4.1.3. COURBES DE FRITTAGE	56
4.1.4. POROSITÉ ET DENSITÉ	58
4.1.5. DISTRIBUTION POROSIMÉTRIQUE	59
4.1.6. MICROGRAPHIES DE LA POROSITÉ.....	65
4.2. LES LIQUIDES INFILTRANTS	66
4.2.1. LA DENSITÉ ET LA VISCOSITÉ	67
4.2.2. LA MOUILLABILITÉ.....	69
4.3. CONCLUSION DE LA SECTION 4.....	77
 5. ÉTUDE DE LA CINÉTIQUE D'INFILTRATION PROPOSÉE	 79

5.1.	QUELQUES OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES	79
5.2.	LE MONTAGE EXPÉRIMENTAL	83
5.3.	EXPLOITATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	88
5.4.	LE RÉSEAUTAGE DU MODÈLE	104
5.5.	CONCLUSION DE LA SECTION 5.....	123
6.	CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	125
6.1.	DISCUSSION.....	125
6.2.	PERSPECTIVES.....	132
6.3.	CONCLUSION FINALE	136
7.	RÉFÉRENCES.....	139
8.	ANNEXES.....	143

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 : EXTRAIT DE LA SÉRIE ÉLECTROCHIMIQUE PROPOSÉE PAR BENTSON	6
TABLEAU 2.2 : VARIATION D'ÉNERGIE LIBRE ΔG^0 POUR DES RÉACTIONS ENTRE DIVERS OXYDES ET L'ALUMINIUM À 1000°C (D'APRÈS LINDSAY ⁽⁷⁾).....	7
TABLEAU 2.3 : RÉACTIONS POSSIBLES ENTRE Al_2O_3 , SiO_2 , AL ET SI ET LEURS ÉNERGIES LIBRES DE RÉACTION (D'APRÈS PRABRIPUTALOONG ⁽¹⁰⁾).....	8
TABLEAU 4.1 : COMPOSITION CHIMIQUE DES MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES, DONNÉE PAR LE MANUFACTURIER (POURCENTAGE EN POIDS).....	49
TABLEAU 4.2 : COMPOSITION CHIMIQUE DES MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES, ISSUE DE L'ANALYSE XRF (POURCENTAGE EN POIDS).....	50
TABLEAU 4.3 : RÉPARTITION DES PHASES CRISTALLINES DANS LES MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES, ISSUE DE L'ANALYSE XRD (EN GRIS FONCÉ, PHASES MAJEURES ; EN GRIS CLAIR, PHASES MOYENNES ; EN BLANC, PHASES MINEURES)	51
TABLEAU 4.4 : DONNÉES STATISTIQUES POROSIMÉTRIQUES	62
TABLEAU 4.5 : DENSITÉ ET VISCOSITÉ EXPÉRIMENTALES DES LIQUIDES INFILTRANTS, MESURÉES À 20°C .	67
TABLEAU 4.6 : DONNÉES SUR LA MOUILLABILITÉ DE L'EAU ET DE L'ALUMINIUM FONDU.....	77
TABLEAU 5.1 : DENSITÉ ET VISCOSITÉ EXPÉRIMENTALES DES LIQUIDES INFILTRANTS, MESURÉES À 20°C .	85
TABLEAU 5.2 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES CONDITIONS EXPÉRIMENTALES ET DES PROFILS D'INFILTRATION OBTENUS.....	87
TABLEAU 5.3 : PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES ISSUS DES ESSAIS D'INFILTRATION	96
TABLEAU 5.4 : CRITÈRES D'ÉVALUATION DES ESSAIS D'INFILTRATIONS	99
TABLEAU 5.5 : COMPARAISON ENTRE LES CINÉTIQUES D'INFILTRATION DANS LA PEAU ET DANS LE CŒUR DES BÉTONS.....	103
TABLEAU 5.6 : INFLUENCE DE LA CONNECTIVITÉ SUR LES PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES	118

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1 : SOLLICITATIONS AUXQUELS SONT SOUMIS LES MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES (D'APRÈS GABIS ⁽¹⁾)	3
FIGURE 2.2 : FORMATION D'UNE PELLICULE D'ALUMINE ENFERMANT UN ESPACE GAZEUX AU CONTACT D'AL ₂ O ₃ AVEC L'ALUMINIUM LIQUIDE	5
FIGURE 2.3: MÉCANISME D'ABSORPTION DE L'HYDROGÈNE PAR L'ALUMINIUM LIQUIDE	6
FIGURE 2.4 : INFLUENCE DU TEMPS SUR LE TAUX DE RÉDUCTION DE LA SILICE PAR L'ALLIAGE 24S À 760°C (D'APRÈS BRONDYKE)	9
FIGURE 2.5 : RELATION ENTRE LA TENEUR EN SILICE ET LA VITESSE D'INFILTRATION D'UN RÉFRACTAIRE ALUMINO-SILICATÉ PAR L'ALLIAGE 24S À 760°C PENDANT 72 HEURES (D'APRÈS BRONDYKE)	9
FIGURE 2.6 : FORMATION DE SILICIUM EN FONCTION DE LA TENEUR EN SILICE DURANT LE CONTACT ENTRE UN RÉFRACTAIRE ALUMINO-SILICATÉ ET L'ALLIAGE 24S À 760°C PENDANT 72 HEURES (D'APRÈS BRONDYKE)	10
FIGURE 2.7 : PROCESSUS D'OXYDO-RÉDUCTION D'UN RÉFRACTAIRE ALUMINO-SILICATÉ AU CONTACT D'UN ALLIAGE AL-MG, PROVOQUANT UNE CROISSANCE INTERNE DE CORINDON (D'APRÈS ALLAIRE)	12
FIGURE 2.8 : DIMINUTION DE LA TENEUR EN MAGNÉSIUM DURANT LA CROISSANCE INTERNE DE CORINDON	13
FIGURE 2.9 : RÉACTIVITÉ DE L'ALLIAGE D'ALUMINIUM EN FONCTION DU RAPPORT ZINC / MAGNÉSIUM (ESSAIS DE CORROSION PENDANT 48H À 800°C ⁽⁸⁾)	15
FIGURE 3.1 : (A) DISTRIBUTION INTERFACIALE RÉELLE DU COMPOSANT I	18
FIGURE 3.2 : REPRÉSENTATION D'UNE GOUTTE LIQUIDE DANS LAQUELLE LA TENSION SURFACIQUE σ CRÉE UN ÉQUILIBRE MÉCANIQUE AVEC LA PRESSION INTERNE À LA GOUTTE	20
FIGURE 3.3 : REPRÉSENTATION DE L'ANGLE DE MOUILLAGE θ POUR UNE INTERFACE TRIPLE LIQUIDE – GAZ – SOLIDE	24
FIGURE 3.4 : SCHÉMATISATION D'UNE GOUTTE POSÉE SUR UN SUBSTRAT SOLIDE	25
FIGURE 3.5 : CONFIGURATION GÉOMÉTRIQUE D'UN LIQUIDE DANS UN TUBE CAPILLAIRE	27
FIGURE 3.6 : ÉLÉMENT DE VOLUME D'UN FLUIDE S'ÉCOULANT DANS UN TUBE VERTICAL	30
FIGURE 3.7 : EXEMPLES DE CONFIGURATION GÉOMÉTRIQUE DU PORE PAR RAPPORT À LA PAROI	38
FIGURE 3.8 : POSITION DU PORE PAR RAPPORT AU BAIN MÉTALLIQUE	39
FIGURE 3.9 : PROFILS DU FRONT DE PÉNÉTRATION EN FONCTION DU TEMPS DANS UN TUBE CAPILLAIRE	46
FIGURE 3.10 : PROFILS DE PÉNÉTRATION EN FONCTION DE LA TAILLE DE PORE DANS UN TUBE CAPILLAIRE	46
FIGURE 4.1 : DISTRIBUTION CLASSE PAR CLASSE EN TAILLE DES GRAINS DES BÉTONS A, B ET C	55
FIGURE 4.2 : DISTRIBUTION CUMULATIVE EN TAILLE DES GRAINS DES BÉTONS A, B ET C	56

FIGURE 4.3 : COURBES DE FRITTAGE DES MATÉRIAUX <i>A</i> , <i>B</i> ET <i>C</i>	57
FIGURE 4.4 : POROSITÉ OUVERTE EN POURCENTAGE DES MATÉRIAUX <i>A</i> , <i>B</i> ET <i>C</i>	58
FIGURE 4.5 : DENSITÉ APPARENTE EN G/CM ³ DES MATÉRIAUX <i>A</i> , <i>B</i> ET <i>C</i>	59
FIGURE 4.6 : COURBES POROSIMÉTRIQUES DES MATÉRIAUX <i>A</i> , <i>B</i> ET <i>C</i>	62
FIGURE 4.7 : MICROGRAPHIE DU BÉTON <i>B</i> (X 5)	65
FIGURE 4.8 : MICROGRAPHIE DU BÉTON <i>C</i> (X 2,5)	66
FIGURE 4.9 : DENSITÉ DE L'ALUMINIUM PUR EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE	68
FIGURE 4.10 : VISCOSITÉ DE L'ALUMINIUM PUR EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE	68
FIGURE 4.11 : PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE LA GOUTTE POSÉE.....	69
FIGURE 4.12 : REPRÉSENTATION DE LA RELATION DE WENZEL DANS LE CAS DU SYSTÈME FER FONDU – ALUMINE À 1600°C	71
FIGURE 4.13 : SCHÉMA DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DE LA « GOUTTE POSÉE »	72
FIGURE 4.14 : PHOTOGRAPHIE D'UNE GOUTTE POSÉE D'ALUMINIUM SUR UN SUBSTRAT D'ALUMINE, À 900°C.....	73
FIGURE 4.15 : ÉVOLUTION DE LA FORME D'UNE GOUTTE D'EAU SUR UN SUBSTRAT ALUMINO-SILICATÉ POREUX.....	76
FIGURE 5.1 : COMPARAISON ENTRE L'INFILTRATION DE LA MATRICE ET L'INFILTRATION DES AGRÉGATS D'UN BÉTON RÉFRACTAIRE.....	80
FIGURE 5.2 : INFLUENCE DES CONCENTRATIONS LOCALES D'AGRÉGATS (COLORISÉS EN VERT) SUR LA CINÉTIQUE D'INFILTRATION	81
FIGURE 5.3 : ILLUSTRATION DE L'EFFET DE PEAU (À GAUCHE, FACE COUPÉE DE L'ÉCHANTILLON ET À DROITE, FACE ORIGINALE DE L'ÉCHANTILLON)	82
FIGURE 5.4 : À GAUCHE, ESSAI D'INFILTRATION DESCENDANTE ET À DROITE, ESSAI D'INFILTRATION ASCENDANTE.....	83
FIGURE 5.5 : SCHÉMA REPRÉSENTATIF DES ÉCHANTILLONS UTILISÉS POUR LES ESSAIS D'INFILTRATION DESCENDANTE.....	84
FIGURE 5.6 : LES DIFFÉRENTES COMPOSANTES D'UN PROFIL D'INFILTRATION.....	86
FIGURE 5.7 : LISSAGE DE LA COURBE EXPÉRIMENTALE POUR LE CENTRE DE L'ÉCHANTILLON B-4, A) PAR LA LOI QUADRATIQUE PURE, B) PAR UN POLYNÔME DU SECONDE DEGRÉ	91
FIGURE 5.8 : LISSAGE DE COURBE EXPÉRIMENTALE POUR LE CÔTÉ GAUCHE DE L'ÉCHANTILLON B-4, A) PAR LA LOI QUADRATIQUE PURE, B) PAR UN POLYNÔME DU SECOND DEGRÉ	92
FIGURE 5.9 : LISSAGE DE COURBE EXPÉRIMENTALE POUR LE CENTRE DE L'ÉCHANTILLON B-4 PAR LA LOI SEMI-LOGARITHMIQUE	94
FIGURE 5.10 : LISSAGE DE COURBE EXPÉRIMENTALE POUR LE CÔTÉ GAUCHE DE L'ÉCHANTILLON B-4 PAR LA LOI SEMI-LOGARITHMIQUE	95

FIGURE 5.11 : A) REPRÉSENTATION TRIDIMENSIONNELLE DU PAQUET DE PORES,	105
FIGURE 5.12 : LES DIFFÉRENTS TYPES D'ENVIRONNEMENTS DANS UN AC : EN GRIS FONCÉ, ENVIRONNEMENT DE VON NEUMANN, ET EN GRIS CLAIR, ENVIRONNEMENT DE MOORE	107
FIGURE 5.13 : SCHÉMATISATION DU NŒUD DE CAPILLAIRES PAR UNE CELLULE CARRÉE	108
FIGURE 5.14 : EFFET SUR LA CINÉTIQUE D'INFILTRATION DE LA DÉCOMPOSITION D'UN CAPILLAIRE EN PLUSIEURS CELLULES	109
FIGURE 5.15 : ORGANIGRAMME SIMPLIFIÉ REPRÉSENTANT L'ALGORITHME DE L'AC	112
FIGURE 5.16 : INTERFACE DE DÉFINITION DE LA GÉOMÉTRIE DE L'ÉCHANTILLON	113
FIGURE 5.17 : INTERFACE DE DÉFINITION DES PARAMÈTRES DU SYSTÈME	114
FIGURE 5.18 : ÉCRAN PRINCIPAL DU PROGRAMME	115
FIGURE 5.19 : DIFFÉRENTES REPRÉSENTATIONS DE LA CONNECTIVITÉ	116
FIGURE 5.20 : EFFET DE LA CONNECTIVITÉ TRANSVERSALE SUR LA CINÉTIQUE D'INFILTRATION (EN NOIR, DONNÉES EXPÉRIMENTALES ISSUES DE L'ÉCHANTILLON B-3)	117
FIGURE 5.21 : EXEMPLE DE DISCRÉTISATION DE LA DISTRIBUTION EN TAILLE DES PORES, POUR LE MATÉRIAU A	120
FIGURE 5.22 : ÉVOLUTION DE LA FORME DU PROFIL D'INFILTRATION DANS UNE STRUCTURE POREUSE SOUMISE À UNE DISTRIBUTION DE TAILLE DE PORE	122
FIGURE 6.1 : DEUX REPRÉSENTATIONS POSSIBLES POUR L'« ÉTALEMENT » DU LIQUIDE INFILTRANT DANS LA STRUCTURE POREUSE : A) PAR LA TORTUOSITÉ $\tau = L/L_0$, B) PAR LA CONNECTIVITÉ $N(L_0)$ DU RÉSEAU	127
FIGURE 6.2 : REPRÉSENTATION DES DEUX TYPES DE CONNECTIVITÉ : À GAUCHE, FORTE CONNECTIVITÉ LONGITUDINALE, ET À DROITE, FORTE CONNECTIVITÉ TRANSVERSALE	128
FIGURE 6.3 : STRUCTURE POREUSES SCHÉMATISÉES D'UN RÉFRACTAIRE À BASE DE CARBURE DE SILICIUM (A) ET D'UN RÉFRACTAIRE ALUMINEUX (B), SELON BOUTIN ⁽³²⁾	130
FIGURE 6.4 : MODÉLISATION DE LA STRUCTURE POREUSE, OFFERTE PAR LE LOGICIEL <i>PORE-COR</i> , DANS LE CAS DE SOL COMPACTÉ	131
FIGURE 6.5 : REPRÉSENTATION DES GRADIENTS DE TEMPÉRATURE ET DE CONCENTRATION À L'INTERFACE RÉFRACTAIRE – ALUMINIUM LIQUIDE	135

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	143
Matériau A	143
Matériau B	151
Matériau C	160
ANNEXE B : CODE DU PROGRAMME INFORMATIQUE	168

1. INTRODUCTION

La dégradation en service d'un revêtement réfractaire par l'action d'un métal liquide, tel que l'aluminium fondu, peut se décomposer idéalement en trois aspects différents : action thermique, action chimique et action mécanique. Des efforts sont actuellement intentés pour considérer une approche commune de la dégradation des réfractaires, par le biais des analyses TCM (thermique – chimique – mécanique). En effet, on peut aisément comprendre que chaque type d'action exerce un effet réciproque sur les autres actions, puisque les trois mécanismes de dégradation ont simultanément lieu lors de la mise en service du four ou de la cuve.

Habituellement, les actions thermomécaniques sont reproduites expérimentalement de façon à ce qu'elles s'exercent sur une surface de l'échantillon. On va ainsi faire des essais d'impacts ou de chocs thermiques sur la présumée face chaude. Mais si l'on veut considérer l'influence que peut avoir la corrosion sur les mécanismes thermomécaniques, on doit prendre en compte le revêtement réfractaire dans tout son volume. Ainsi vient le concept d'action volumique, conséquence de l'infiltration du métal liquide dans le réfractaire. L'infiltration du métal va provoquer, outre une corrosion du réfractaire, une modification des gradients thermiques à l'intérieur du réfractaire, ainsi que des microfissures, des retraits ou des dilatations suite aux réactions chimiques et aux gradients thermiques.

L'étude de ces mécanismes internes de dégradation est difficile du seul point de vue pratique. La modélisation de ces phénomènes doit permettre, en accompagnant des essais expérimentaux, d'avoir une meilleure compréhension de l'interdépendance de ces phénomènes, et de mieux prévoir les conséquences des mécanismes de dégradation (vieillessement, écaillage et inclusions dans le métal). De plus, la modélisation est le moyen le plus efficace pour prendre en compte l'état de fatigue du matériau et son

comportement à long terme. Un tel travail de modélisation doit naturellement commencer par l'origine de la dégradation volumique : l'infiltration du métal liquide...

C'est dans le cadre de la chaire industrielle REFRAL concernant les matériaux réfractaires pour les unités de traitement et de transport de l'aluminium liquide, que cette étude a été réalisée. L'objectif de cette étude est de caractériser l'infiltration d'un liquide dans la structure poreuse d'un béton réfractaire, en l'absence de réactions chimiques et de gradients thermiques. La cinétique d'infiltration d'un liquide dans un matériau réfractaire demeure peu connue, car la structure poreuse très hétérogène est difficile à modéliser. Il s'agit donc de définir les paramètres pertinents pour cette étude et de caractériser les systèmes en présence. L'omission des réactions chimiques et des gradients thermiques n'a que pour unique but de simplifier l'étude.

Une mise en contexte est proposée en section 2, afin de mieux connaître les mécanismes de corrosion des réfractaires par l'aluminium liquide et l'importance relative de l'infiltration dans ces mécanismes. Les paramètres principaux contrôlant la cinétique d'infiltration sont présentés en section 3 et une loi simple d'écoulement d'un liquide dans un capillaire est développée. Le lecteur connaissant déjà ces mécanismes peut passer à la section 4, où il trouvera des informations concernant la caractérisation de la structure poreuse des bétons et des liquides infiltrants. Dans la section 5, le dispositif expérimental et l'exploitation des résultats sont décrits. Les derniers développements du modèle de cinétique d'infiltration y sont présentés. Enfin, la section 6 sert de discussion et de conclusion à ce projet.

2. GÉNÉRALITÉS

Comme il a été dit en introduction, les matériaux réfractaires sont, d'une manière générale, soumis à des actions mécaniques, des actions thermiques et des actions chimiques (figure 2.1).

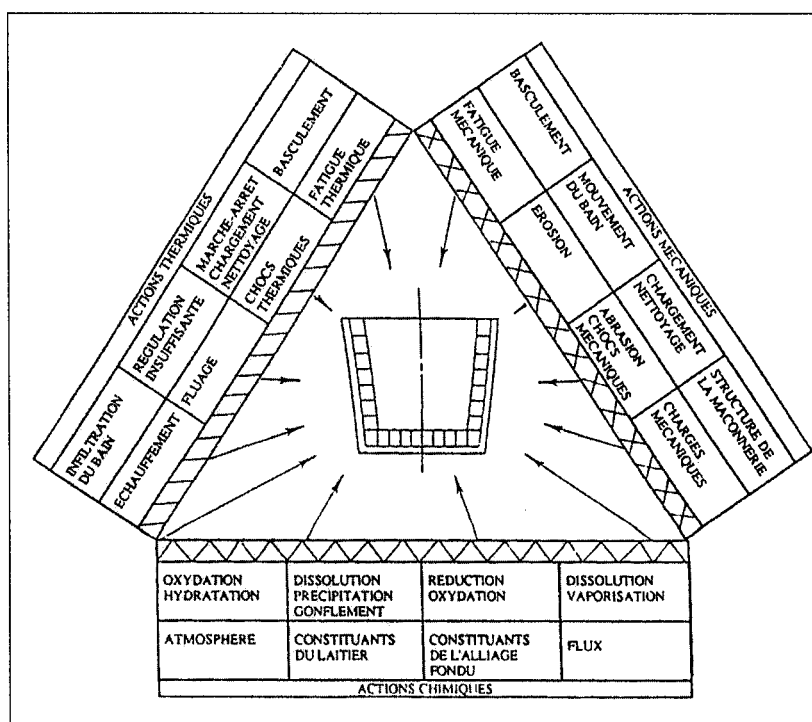


Figure 2.1 : Sollicitations auxquelles sont soumis les matériaux réfractaires (d'après Gabis ⁽¹⁴⁾)

Dans le cadre des actions mécaniques ⁽¹⁴⁾, on peut citer les charges exercées par les parties hautes d'une maçonnerie sur les réfractaires placés en partie basse, les chocs et les frottements liés au chargement ou au nettoyage du four, les mouvements du bain métalliques, surtout dans les fours basculants.

Dans le cadre des action thermiques, des températures locales excessives peuvent provoquer des infiltrations du bain en profondeur dans le garnissage et des échauffements intempestifs avec risque de fluage. L'ouverture des portes crée de violents chocs thermiques, ainsi que les arrêts. Les mouvements du bain métallique, à l'occasion du basculement, créent aussi des variations brutales de température du garnissage conduisant à une fissuration par fatigue.

Enfin, les actions chimiques de l'atmosphère, des laitiers, de l'alliage lui-même, des flux provoquent des dégradations souvent très graves. Ces actions, réunies sous le terme de corrosion, impliquent un phénomène complexe mêlant différents mécanismes, tels que la dissolution et l'infiltration, ainsi que des réactions d'oxydo-réduction. Le mécanisme d'infiltration d'un métal liquide dans un réfractaire est donc généralement inclus dans le phénomène de corrosion, bien qu'il participe probablement à la dégradation globale du matériau. Afin de nous replacer dans le cas de l'aluminium, une brève revue de la corrosion des réfractaires par l'aluminium liquide s'impose...

2.1. MÉCANISMES DE CORROSION DES ALUMINO-SILICATES PAR L'ALUMINIUM LIQUIDE

Les réactions chimiques qui vont avoir lieu entre les réfractaires alumino-silicatés et l'aluminium liquide vont surtout dépendre du fait si l'aluminium est pur ou allié.

2.1.1. Cas de l'aluminium pur

Si l'on considère la composante alumineuse du réfractaire, on peut dire que, d'un point de vue purement chimique, Al_2O_3 est le réfractaire idéal en présence d'aluminium fondu. En effet, le corindon est un oxyde passif d'une grande stabilité. Les expériences de Depussay ⁽¹²⁾ révèlent cependant la formation d'un espace gazeux contenant essentiellement H_2 , Al , Al_2O et O_2 , ainsi que le développement d'une pellicule d'alumine entre le réfractaire et le bain métallique.

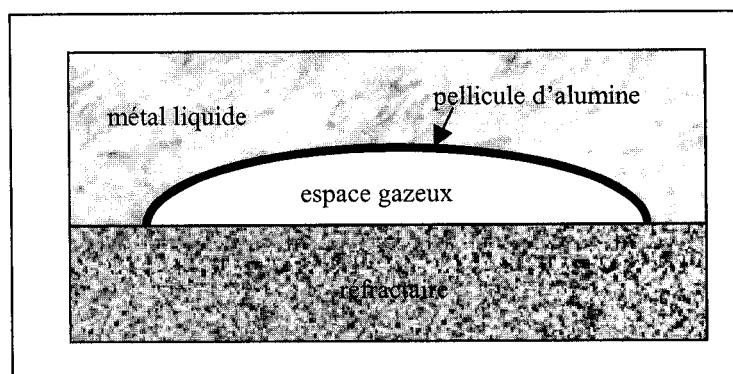


Figure 2.2 : Formation d'une pellicule d'alumine enfermant un espace gazeux au contact d' Al_2O_3 avec l'aluminium liquide

La pellicule d'alumine à l'interface espace gazeux – aluminium se développe seulement lorsque l'équilibre entre les deux phases est atteint. L'origine de l'alumine peut provenir de l'oxydation de l'aluminium vaporisé selon la réaction suivante :



L'oxygène nécessaire se trouve aussi bien dans l'atmosphère ambiante que dans les cavités du réfractaire. Une autre source possible d' Al_2O_3 est l'interaction entre l'aluminium et la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère (figure 2.3).

Concernant les autres composants des réfractaires alumino-silicatés, on trouve bien évidemment de la silice, en tant que composant principal (parfois jusqu'à 60 %), ainsi que jusqu'à 6 % de TiO_2 , des oxydes de fer, des oxydes alcalins et alcalino-terreux.

L'affinité des éléments pour l'oxygène donné par Bentson ⁽⁶⁾ (tableau 2.1) indique la capacité des métaux à s'oxyder en réduisant les oxydes de métaux plus nobles. SiO_2 , Fe_2O_3 et TiO_2 seraient donc réduits par l'aluminium, mais CaO , MgO , Na_2O et K_2O ne

le seraient pas. Cependant ce classement ne prend pas en compte l'influence de la température et de la combinaison chimique.

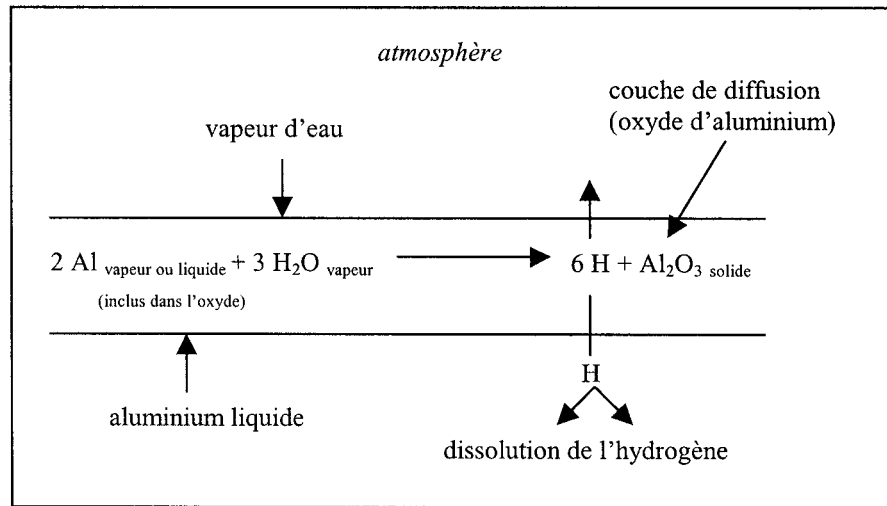


Figure 2.3: Mécanisme d'absorption de l'hydrogène par l'aluminium liquide

Oxyde facile à réduire	Si / SiO ₂
	Cu / CuO
	Fe / Fe ₂ O ₃ , FeO
	Zn / ZnO
	Ti / TiO ₂
	Zr / ZrO ₂
	Cr / Cr ₂ O ₃
	Al / Al ₂ O ₃
	Mn / MnO
	Mg / MgO
	Ca / CaO
	Na / Na ₂ O
Métal facile à oxyder	K / K ₂ O

Tableau 2.1 : Extrait de la série électrochimique proposée par Bentson ⁽⁶⁾

Le tableau 2.2 rassemble des valeurs de variation d'énergie libre associée à la réaction de certains oxydes avec l'aluminium à 1000°C. Ainsi, les oxydes placés au-dessus de Al₂O₃ dans le tableau peuvent être réduits par l'aluminium. Le magnésium et le calcium, par contre, réduisent Al₂O₃.

Oxyde (MO)	ΔG^0_{1000} (kcal)
3 FeO	-187
3 ZnO	-149
Cr ₂ O ₃	-123
3 Na ₂ O	-123
3/2 SiO ₂	-78
3/2 TiO ₂	-59
Al ₂ O ₃	0
3 BaO	0
3 MgO	+28
3 CaO	+54

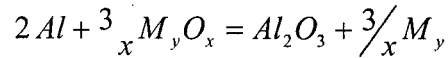


Tableau 2.2 : Variation d'énergie libre ΔG^0 pour des réactions entre divers oxydes et l'aluminium à 1000°C (d'après Lindsay ⁽²⁵⁾)

Suite à de nombreuses expériences, il a été bien établi que la silice combinée ou libre est réduite par l'aluminium, selon la réaction suivante :



Cette réaction est irréversible et se déroule avec libération d'une grande quantité d'énergie ⁽¹³⁾. La réduction de la silice et la formation simultanée d'Al₂O₃ sont accompagnées par une altération de la densité, ce qui provoque un changement de la densité du matériau. La transformation d'une unité de volume de cristobalite conduit à 0,61 unité de volume d'alumine. Cela signifie un retrait de volume de 39 %. Dans le cas de la mullite, le retrait de volume s'exerce à hauteur de 18 % ⁽³⁶⁾.

En comparant les valeurs de l'énergie libre de réaction pour diverses réactions possibles entre Al₂O₃, SiO₂, Al et Si (tableau 2.2), il est évident que seule la réaction (2.2) est probable.

Réaction	Energie libre de réaction ΔG_{800}^0 (kcal)
$4 \text{ Al} + \text{O}_2 = 2 \text{ Al}_2\text{O}$	-98
$2 \text{ Al} + \text{O}_2 = 2 \text{ AlO}$	-56
$4 \text{ Al} + 3 \text{ O}_2 = 2 \text{ Al}_2\text{O}_3$	-738
$4 \text{ Al} + 3 \text{ SiO}_2 = 2 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{ Si}$	-225
$\text{Al}_2\text{O}_3 + 2 \text{ Si} = \text{Al}_2\text{O} + 2 \text{ SiO}$	+208
$4 \text{ Al} + \text{SiO}_2 = 2 \text{ Al}_2\text{O} + \text{Si}$	-99
$2 \text{ Al} + \text{SiO}_2 = \text{Al}_2\text{O} + \text{SiO}$	-15
$2 \text{ Al} + \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{O} + \text{H}_2$	-86
$\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3 = 3 \text{ AlO}$	+198
$4 \text{ Al} + \text{Al}_2\text{O}_3 = 3 \text{ Al}_2\text{O}$	-21
$2 \text{ Si} + \text{O}_2 = 2 \text{ SiO}$	-112
$\text{Si} + \text{SiO}_2 = 2 \text{ SiO}$	+54
$\text{Si} + \text{H}_2\text{O} = \text{SiO} + \text{H}_2$	-12

Tableau 2.3 : Réactions possibles entre Al_2O_3 , SiO_2 , Al et Si et leurs énergies libres de réaction (d'après Prabripataloong ⁽³³⁾)

Les conditions sont différentes en présence d'oxygène (pression normale). Les interactions entre l'aluminium et la silice commencent avec un certain retard dû à la couche d'oxyde qui se forme instantanément sur l'aluminium dès qu'il y a de l'oxygène. En plongeant la silice dans le métal, cette pellicule d'oxydation est entraînée avec la silice et peut agir comme barrière entre la silice et le métal environnant.

L'intensité et la vitesse de réaction sont des paramètres fondamentaux pour la durée de vie d'un revêtement de four. La transformation de l'aluminium en Al_2O_3 provoque une perte irréversible de métal. Par ailleurs, le silicium va se joindre au bain métallique, dégradant la qualité des alliages au taux d'impuretés bien défini. Pour Brondyke ⁽⁹⁾, l'infiltration de l'aluminium dans le réfractaire alumino-silicaté va avoir lieu en parallèle à la réaction (2.2). Il va donc se créer une compétition entre la diffusion de l'aluminium du bain vers l'intérieur du réfractaire et la diffusion du silicium dans l'autre sens. Le métal infiltré forme une barrière continuellement croissante contre la diffusion ; la vitesse de diffusion, comme la vitesse de réduction de la silice, va devenir plus faible (figure 2.4).

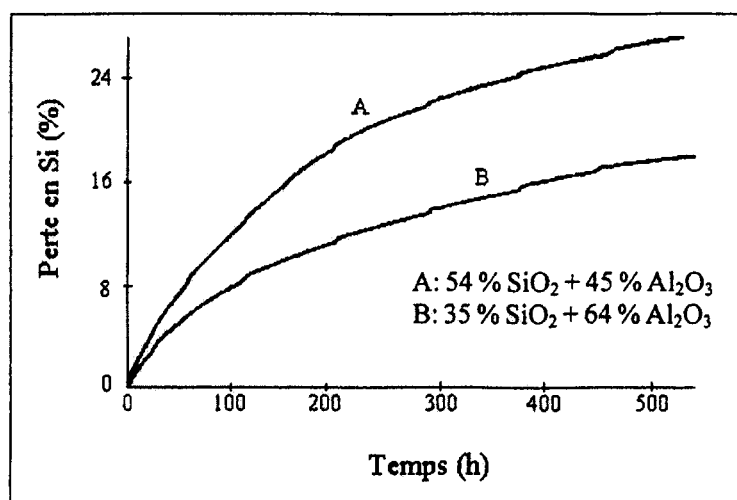


Figure 2.4 : Influence du temps sur le taux de réduction de la silice par l'alliage 24S à 760°C (d'après Brondyke ⁽⁹⁾)

Il découle des expériences de Brondyke qu'il n'y a pas de relation entre l'ampleur de l'infiltration et la teneur en silice : comme le montre la figure 2.5, il n'y a pas de corrélation. Des matériaux à 99 % d' Al_2O_3 sont également infiltrés, même si la réaction produisant du silicium n'a pratiquement pas lieu. L'auteur attribue ce comportement à l'utilisation des argiles dans la fabrication de ces réfractaires. L'infiltration a lieu, en effet, à travers la phase liante. En utilisant des liants organiques, il n'apparaît pas d'infiltration.

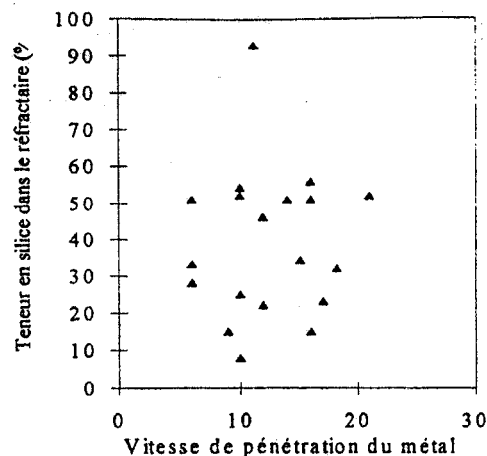


Figure 2.5 : Relation entre la teneur en silice et la vitesse d'infiltration d'un réfractaire alumino-silicaté par l'alliage 24S à 760°C pendant 72 heures (d'après Brondyke ⁽⁹⁾)

Par ailleurs, la formation du silicium dépend de la teneur initiale en silice (figure 2.6).

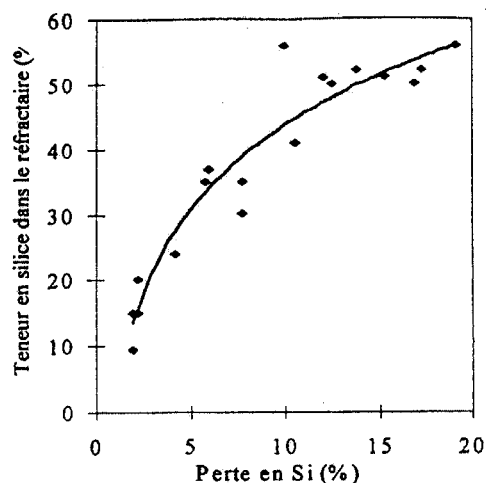
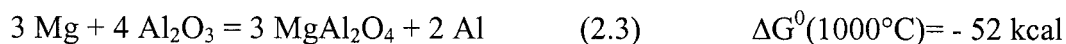


Figure 2.6 : Formation de silicium en fonction de la teneur en silice durant le contact entre un réfractaire aluminosilicaté et l'alliage 24S à 760°C pendant 72 heures (d'après Brondyke ⁽⁹⁾)

2.1.2. Cas des alliages d'aluminium

Bien que certains éléments d'alliage peuvent avoir une influence mineure sur les mécanismes de corrosion, c'est surtout le magnésium qui joue un rôle particulièrement néfaste pour le réfractaire alumineux. La formation de spinelle est énergétiquement très probable, mais il peut se former également du périclase.

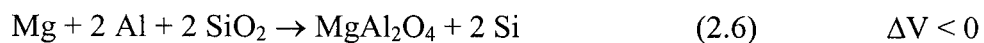


Les mécanismes de corrosion des aluminosiliceux par les alliages Al-Mg ont jusque là été le mieux décrits par le modèle développé par Allaire ^(3, 4). Ce modèle est d'abord basé sur le mécanisme d'oxydation directe du métal, en faisant intervenir la migration du métal fondu à travers une couche discontinue et croissante d'alumine, vers

la source d'oxygène. Les principales étapes associées à ce mécanisme sont les suivantes :

- formation à la surface de l'alliage d'une couche poreuse de spinelle primaire et d'une couche de magnésie par dessus
- migration de l'alliage à travers la couche de spinelle primaire et réduction du magnésium contenu dans l'alliage
- décomposition de la couche de magnésie au contact du métal liquide appauvri en magnésium
- diffusion de l'oxygène à travers la couche de spinelle primaire, conduisant à la nucléation, puis à la croissance de cristaux discontinus d'alumine. Cette discontinuité des cristaux est favorisée par la présence de magnésium qui abaisse la tension de surface du métal liquide et favorise leur mouillage. L'oxygène contribue aussi à la formation d'une couche dense de spinelle secondaire sous la couche de magnésie.
- diffusion solide lente du magnésium à travers la couche de magnésie favorisant l'accumulation de magnésium gazeux sous cette couche
- rupture de la couche de magnésie lorsque le magnésium gazeux atteint une pression partielle suffisamment importante

Dans le cas de la croissance interne du corindon, c'est-à-dire lorsque l'alliage fondu Al-Mg est directement en contact avec le réfractaire, le réfractaire va être corrodé selon un processus similaire, décrit par le schéma de la figure 2.7. Dans ce processus, une couche initiale de spinelle est supposé se former à l'interface réfractaire / métal liquide, lorsque la concentration en magnésium de ce dernier est plus élevée que la concentration C_{LAS} d'équilibre des trois phases liquide-alumine-spinelle. Deux réactions peuvent être responsables de la formation du spinelle :



pour lesquelles ΔV est le changement de volume associé à la formation du spinelle. La réaction (2.6) serait la plus probable.

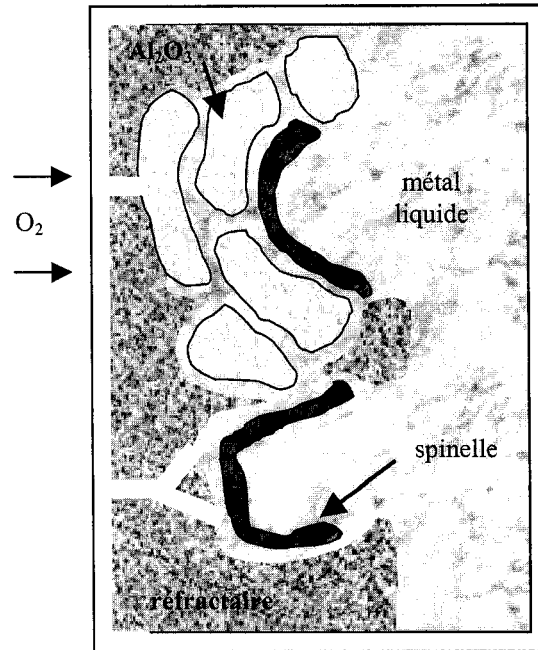
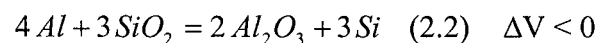


Figure 2.7 : Processus d'oxydo-réduction d'un réfractaire alumino-silicaté au contact d'un alliage Al-Mg, provoquant une croissance interne de corindon (d'après Allaire)

Puisque la formation de spinelle suite aux réactions (2.3) et (2.6) est accompagnée d'un changement de volume, les couches de spinelle contiennent probablement des microcanaux. Comme le montre la figure 2.8, la diminution de la teneur en magnésium est aussi supposée avoir lieu durant l'infiltration du métal liquide au travers de ces microcanaux, jusqu'à ce que la concentration en magnésium soit égale à la concentration C_{LAS} . Le métal liquide, ayant la concentration C_{LAS} , devrait entrer en contact avec le réfractaire et le corroder suivant la réaction d'oxydo-réduction désormais connue :



La réaction (2.2) est accompagnée d'une diminution de volume, comme on l'a déjà dit, ce qui permettrait une infiltration accrue du métal liquide dans le réfractaire. Le réfractaire va être progressivement transformé en un composite Al_2O_3 / Al. La production de silicium, suite à la réaction (2.2), devrait aussi favoriser l'infiltration du métal, puisque cet élément réduit la viscosité du métal liquide. Durant le processus, la formation d'une couche continue d'alumine est évitée, car la présence du magnésium réduit la tension de surface du métal liquide et le rend plus mouillant.

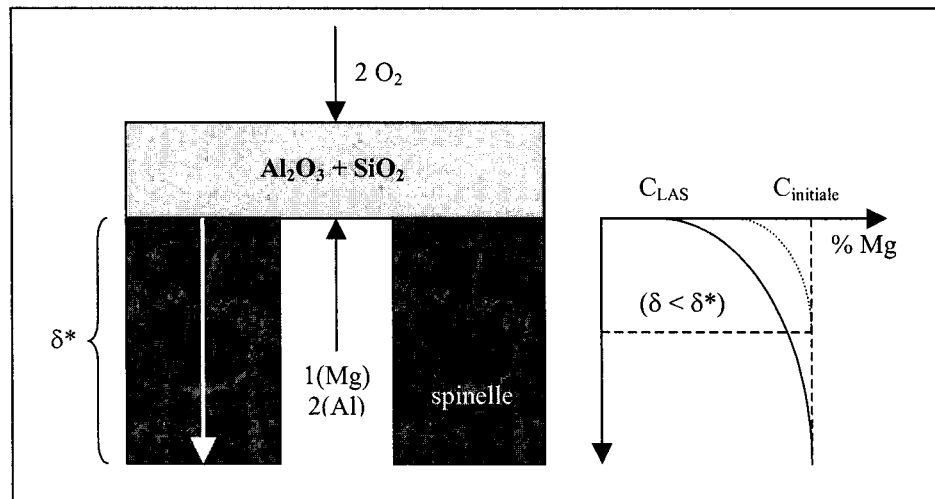


Figure 2.8 : Diminution de la teneur en magnésium durant la croissance interne de corindon

Les résultats présentés par Allaire⁽³⁾ montrent que la corrosion est plus importante en l'absence de magnésium, que ce soit sous atmosphère normale (air) ou sous atmosphère d'argon, suite au test de type creuset (dans lequel l'échantillon forme le creuset et contient le métal) à 1150°C, alors que l'influence du magnésium est négligeable pour le même type de test à 850°C. Par ailleurs, on observe une corrosion accrue avec un alliage d'aluminium à 5 % en poids de magnésium, en comparaison à l'aluminium pur, dans le cas d'un test d'immersion totale. Une explication possible serait que le processus contrôlant la cinétique de corrosion pour la croissance interne de corindon dépende de la température. À basse température, la réduction de la silice

semble contrôler la cinétique de corrosion. Dans ce cas, une plus grande continuité de nodules d'alumine en l'absence de magnésium serait responsable de la moindre corrosion. À haute température, la cinétique de réduction de la silice est plus rapide. L'infiltration du métal peut alors devenir le processus contrôlant. Avec du magnésium, une moindre corrosion peut être attribuée à la présence de la couche de spinelle qui réduirait la vitesse d'infiltration par le métal.

Afin d'achever la description de l'influence des éléments d'alliage sur la corrosion des réfractaires alumino-silicatés, on peut aussi citer l'action néfaste du zinc, renforcée par la présence de magnésium à des teneurs moyennes. Pour des teneurs en magnésium inférieures à 0,3 % (teneur pour laquelle l'influence du magnésium devient négligeable ^(3,12)), c'est le rapport zinc / magnésium qui détermine l'agressivité de l'alliage. La figure 2.9 montre la réactivité de l'alliage d'aluminium en fonction de ce rapport. La réaction est faible pour des rapports inférieurs à 1, et elle devient très importante pour des rapports supérieurs à 3 ou 4.

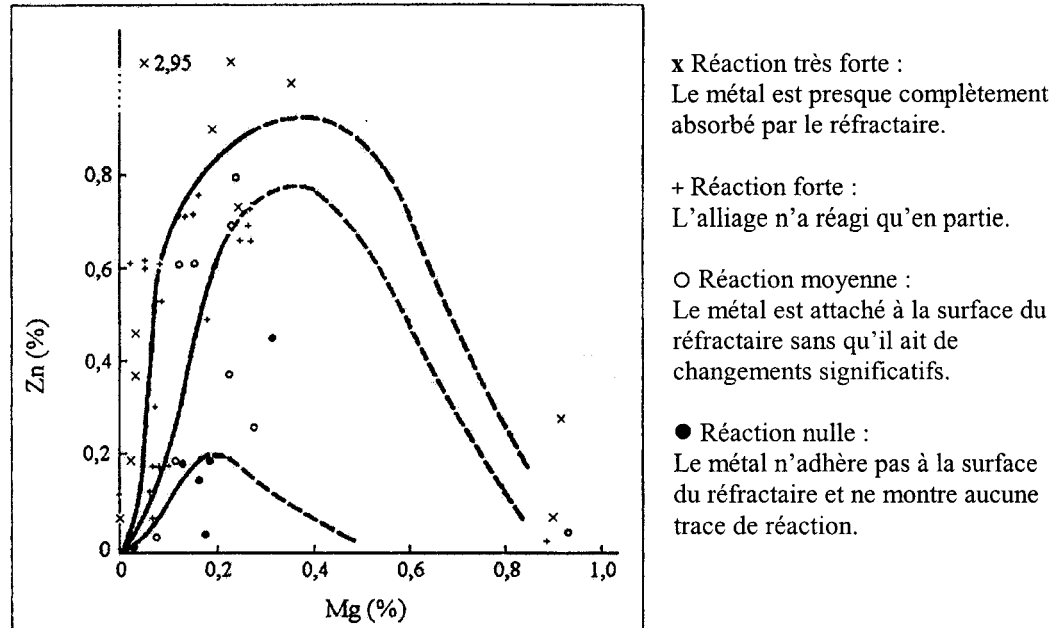


Figure 2.9 : Réactivité de l'alliage d'aluminium en fonction du rapport zinc / magnésium (essais de corrosion pendant 48h à 800°C ⁽¹³⁾)

2.2. CONCLUSION DE LA SECTION 2

Nous avons vu que les réfractaires alumino-silicatés, lorsqu'ils sont utilisés dans les fours de traitement de l'aluminium fondu, subissent de nombreuses dégradations dues à des actions thermo-mécaniques, comme les impacts, l'usure et les chocs thermiques, et à la corrosion par le métal liquide. De par leur nature poreuse, les matériaux réfractaires vont, par ailleurs, être infiltrés par le métal liquide suivant une cinétique d'infiltration plus ou moins rapide. Cette infiltration va modifier les gradients thermiques internes au matériau et va permettre au métal de réagir chimiquement avec le réfractaire. Il va s'ensuivre une dégradation globale du matériau, qui va principalement se traduire par une importante diminution des propriétés mécaniques.

Nous avons aussi vu que l'infiltration du métal liquide dans le réfractaire s'accompagne toujours de réactions chimiques. Le type et la cinétique de ces réactions vont dépendre de la composition du réfractaire, mais aussi de la nature de l'alliage d'aluminium. La corrosion du réfractaire alumino-silicaté, correspondant généralement à la réduction de la silice contenue dans le réfractaire par l'aluminium fondu, va voir sa cinétique modulée par la température de réaction, la teneur en silice du réfractaire, la diffusion du silicium et du magnésium dans le métal liquide, ainsi que la capacité du métal liquide à entrer en contact avec la silice du réfractaire. Cette capacité peut être évaluée par la cinétique d'infiltration du métal liquide au travers des couches d'alumine et de spinelle, au travers des espaces nouvellement créés suite à la réduction de la silice ou suite à la microfissuration du matériau, et surtout au travers de la porosité préexistante contenue dans le réfractaire.

Le contexte d'infiltration des réfractaires alumino-silicatés par l'aluminium fondu étant ainsi décrit, nous allons par la suite nous consacrer à l'étude de la cinétique d'infiltration. Les réactions chimiques ont été sciemment exclues de cette étude, dans l'unique but de simplifier l'étude. Naturellement, elles ont une influence importante sur la cinétique d'infiltration, puisqu'elles modifient directement les paramètres de la cinétique d'infiltration. Les réactions chimiques peuvent expliquer, comme nous le verrons, l'écart entre les modèles théoriques de cinétique d'infiltration et la réalité. Un autre paramètre, qui ne sera pas pris en compte lors de cette étude, mais qui peut avoir son importance, est l'influence des gradients de température. Néanmoins, nous allons nous intéresser aux principaux paramètres contrôlant la cinétique d'infiltration : mouillabilité, viscosité, densité, etc.

3. LES PARAMÈTRES CONTRÔLANT LA CINÉTIQUE D'INFILTRATION

Les paramètres contrôlant la cinétique d'infiltration d'un réfractaire par un métal fondu sont nombreux et complexes suite aux couplages qui peuvent exister entre eux. Cependant, lorsque l'on considère l'aspect purement physique du problème, c'est-à-dire l'infiltration exempte de corrosion, le nombre de paramètres diminue sensiblement. De plus, si l'on idéalise la structure poreuse sous forme d'un ensemble de tubes capillaires, il est possible de déterminer une cinétique d'infiltration relativement simple, en fonction de certains paramètres, tels que la mouillabilité.

3.1. MOUILLABILITÉ ET LOI DE CAPILLARITÉ

Le concept de mouillabilité est un concept peu courant dans la vie quotidienne, et pourtant il fut étudié dès le début du XIX^{ème} siècle par Young et Laplace. Il peut être représenté en posant une goutte d'eau sur un revêtement en Teflon[®] extrêmement propre ; lorsque l'on observe le profil de la goutte, on se rend compte qu'il est proche de celui d'une calotte sphérique. Malgré le phénomène de pesanteur qui s'exerce toujours sur la goutte, celle-ci garde une forme très arrondie et ne s'étale pas. De la même manière, si l'on pose une goutte d'huile sur ce même revêtement, on va observer un étalement rapide de la goutte. Celle-ci montre encore une certaine courbure dans sa forme, mais bien moins marquée que dans le cas de la goutte d'eau.

Finalement, on peut dire que la mouillabilité est la capacité d'un liquide à s'étaler sur une surface solide, en présence d'un fluide environnant. Afin de le décrire de manière scientifique, le concept de mouillabilité doit être perçu à différentes échelles. La mécanique des milieux continus échoue dans l'explication des phénomènes de capillarité, d'où la nécessité d'études à l'échelle moléculaire et l'intérêt porté sur le sujet

par les physico-chimistes. Avec une autre approche, les ingénieurs sont des utilisateurs des phénomènes de capillarité ; ils ont besoin de lois simples, leur permettant de faire les calculs les plus rigoureux possibles. Entre les deux, la thermomécanique propose des grandeurs macroscopiques, telles que les tensions interfaciales.

3.1.1. Aperçu de l'approche thermodynamique

L'interface entre deux phases consiste en une couche d'épaisseur finie dans laquelle les caractéristiques, telles que la concentration C_i d'un composant i en moles par unité de volume, varient de manière continue ⁽¹¹⁾. Aux frontières de la couche, toutes les caractéristiques vont fusionner pour donner les caractéristiques des phases primaires. La figure 3.1b représente le modèle de l'interface introduit par Gibbs afin de permettre d'exprimer simplement la thermodynamique du système.

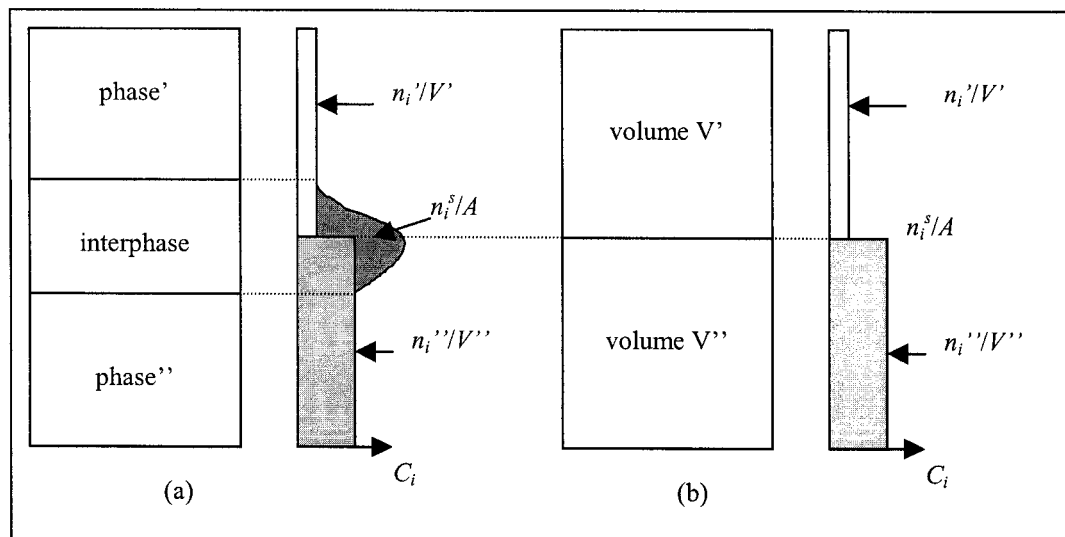


Figure 3.1 : (a) Distribution interfaciale réelle du composant i

(b) Distribution interfaciale selon le modèle de Gibbs

Dans ce modèle, les deux phases primaires sont supposées rester homogènes jusqu'à la surface de séparation, d'épaisseur nulle. Si C_i' est la fraction molaire du

composant i dans une des phases, loin de l'interface, et V' est le volume de cette phase dans le modèle, le nombre de moles n_i' de i dans cette phase est :

$$n_i' = C_i' V' \quad (3.1)$$

De la même manière, pour l'autre phase :

$$n_i'' = C_i'' V'' \quad (3.2)$$

Pour que la stœchiométrie du modèle soit équivalente à la stœchiométrie réelle, un certain nombre de moles n_i^s doit être attribué à la surface de séparation de telle sorte que :

$$n_i^s = n_i - n_i' - n_i'' \quad (3.3)$$

où n_i est le nombre total de moles du composant i dans tout le système. Il faut noter que n_i^s peut être positif ou négatif. En divisant n_i^s par l'aire A de la surface de séparation, on définit l'« adsorption » Γ_i du composant i d'après l'équation suivante :

$$\Gamma_i = n_i^s / A \quad (3.4)$$

De la même manière, une valeur d'« excès » peut être attribuée à toutes les propriétés extensives du système. En particulier, on peut définir l'entropie de surface S^s par $S^s = S - S' - S''$ et l'énergie libre de surface (dite de Helmholtz) F par $F^s = F - F' - F''$.

Il est important de réaliser que les valeurs des quantités extensives qui sont attribuées à la surface de séparation suivant le modèle de Gibbs, varient lorsque la position de cette surface change. Cette difficulté, qui donne au modèle de Gibbs un caractère peu physique, peut se faire moins présente dans certaines circonstances en localisant la surface de telle manière qu'une quantité devienne nulle.

La présence d'une tension à l'interface entre un liquide pur et un gaz peut être expliquée qualitativement de la manière suivante. Les molécules à la surface ou près de la surface sont attirées vers l'intérieur ou dans les directions parallèles à la surface par leurs voisines. Cette force n'est pas contrebalancée par une force correspondante vers

l'extérieur à cause de la faible densité (et probablement de la nature différente) des molécules en phase gazeuse. Ceci signifie qu'un travail doit s'appliquer de façon à amener une molécule interne à la phase vers la surface. Cette énergie supplémentaire possédée par les molécules près de la surface peut alors être exprimée en terme d'énergie par unité de surface.

Dans le cas des liquides, les molécules sont suffisamment mobiles pour pouvoir répondre au déséquilibre des forces s'exerçant sur elles dans la couche de surface. Ceci se manifeste, dans le cadre de l'équilibre mécanique, par une surface se comportant comme une membrane étirée par une tension (la « tension de surface » γ) ayant les dimensions d'une force par unité de longueur (l'unité la plus courante pour la tension de surface est le dyne/cm, avec $1 \text{ dyne/cm} = 10^{-3} \text{ N/m}$). Cette tension de surface est la même en tout point et dans toutes les directions de la surface. C'est une valeur directement accessible de manière expérimentale : γdA est le travail mécanique requis pour créer une surface supplémentaire dA .

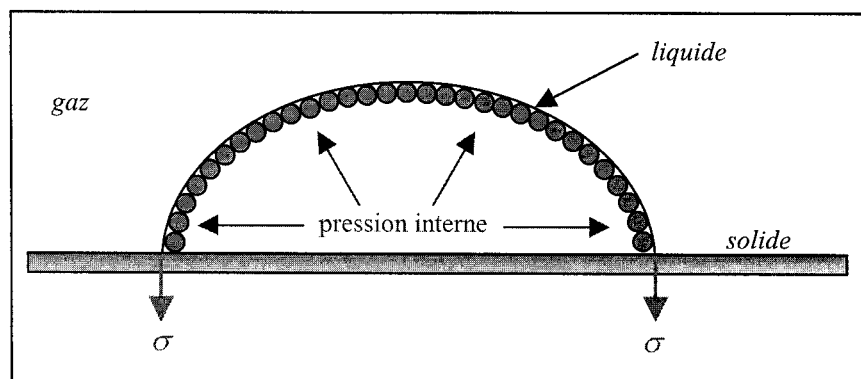


Figure 3.2 : Représentation d'une goutte liquide dans laquelle la tension superficielle σ crée un équilibre mécanique avec la pression interne à la goutte

Le différentiel total d'énergie libre d'un système consistant en deux phases fluides séparées par une interface ayant une tension de surface γ peut s'exprimer, dans le cadre du modèle de Gibbs, par :

$$dF = -P'dV' - P''dV'' - SdT + \gamma dA + \sum \mu_i' dn_i' + \sum \mu_i'' dn_i'' + \sum \mu_i^s dn_i^s \quad (3.5)$$

où P' et P'' sont les pressions des deux phases, S et T sont respectivement l'entropie et la température du système, μ_i' et μ_i'' sont les potentiels chimiques du composant i dans les phases primaires. Le potentiel chimique μ_i^s de i à la surface de séparation est défini par :

$$\mu_i^s = \frac{\partial F^s}{\partial n_i^s} = \frac{1}{A} \frac{\partial F^s}{\partial \Gamma_i} \quad (3.6)$$

Les trois potentiels chimiques dans les deux phases et à la surface peuvent être différents, puisque le système peut ne pas être en équilibre. La tension de surface peut alors être définie thermodynamiquement par :

$$\gamma = \left(\frac{\partial F}{\partial A} \right)_{T, V, n_i', n_i'', n_i^s} \quad (3.7)$$

En utilisant encore le modèle de Gibbs, on peut montrer que l'équation (3.5) donne :

$$\gamma = \frac{F^s}{A} - \sum_i \Gamma_i \mu_i^s \quad (3.8)$$

Lorsque la position de la surface de séparation est choisie de telle manière que $\sum_i \Gamma_i \mu_i^s = 0$, γ devient égale à l'énergie libre de surface par unité de surface. Ceci explique pourquoi les concepts de tension de surface et d'énergie libre de surface ne sont pas toujours distingués dans la littérature. La tension de surface et l'énergie libre de surface sont liées, mais sont des concepts distincts : la tension de surface d'un liquide est une propriété bien définie et mesurable, alors que l'énergie libre de surface est une quantité abstraite qui dépend du choix de la surface de séparation la définissant. En

général, pour les différencier, on note l'énergie libre de surface γ et la tension de surface σ .

Comme dans le cas des liquides, les atomes dans la couche de surface d'un solide subissent un déséquilibre des forces dû à leur environnement asymétrique, ce qui donne naissance à un phénomène analogue à la tension de surface des liquides. Cependant, à cause de la mobilité plus limitée des atomes dans les solides, cette tension n'est ni isotrope ni uniforme. La principale différence avec les liquides est que, dans le cas des solides, cette tension n'est pas directement accessible expérimentalement en mesurant la quantité de travail nécessaire pour étirer la surface d'une quantité dA . La tension à une interface impliquant une phase solide demeure un concept abstrait qui peut être seulement défini par rapport à la thermodynamique du système. Afin que la théorie établie pour les liquides reste applicable à de telles interfaces, cette tension est simplement définie par rapport à l'énergie libre du système en utilisant les équations (3.7) ou (3.8). Par ailleurs, on va considérer, chaque fois que c'est possible, que l'interface de séparation est choisie de telle sorte que $\sum_i \Gamma_i \mu_i^s = 0$, ce qui rend inutile la distinction entre tension interfaciale et énergie interfaciale.

Dans le cas des interfaces solide – liquide, il peut être parfois intéressant de concevoir la tension interfaciale γ_{sl} par rapport aux tensions γ_{sv} et γ_{lv} des surfaces solide et liquide dans le vide. On peut ainsi définir le travail d'adhésion W_a par :

$$W_a = \gamma_{sv} + \gamma_{lv} - \gamma_{sl} \quad (3.9)$$

W_a possède donc les dimensions d'une énergie par unité de surface. Cette quantité correspond au travail qui doit être fourni pour séparer une unité de surface des deux phases dans le vide. C'est donc une mesure de la force de liaison entre les deux phases.

3.1.2. Application macroscopique : la loi de capillarité

L'approche thermodynamique a donc permis de définir une propriété macroscopique, la tension de surface σ , caractérisant l'excès d'énergie stockée au voisinage de la zone de transition entre la phase liquide et la phase gazeuse.

C'est en utilisant cette tension de surface comme facteur de proportionnalité que Laplace a proposé en 1806 une loi liant le saut de pression de chaque point de l'interface liquide – gaz à la courbure moyenne H en ce point ⁽²²⁾. Cette loi, relativement simple et qui n'a jamais été remise en question, s'exprime ainsi :

$$P_{\text{gaz}} - P_{\text{liquide}} = 2 \sigma H \quad (3.10)$$

Il faut rappeler que le signe de chacun des membres de cette relation dépend de l'orientation de la normale unitaire \vec{a}_3 à l'interface liquide – gaz, définie une fois pour toute par le choix du paramétrage permettant de représenter analytiquement cette surface. En effet, ce choix implique la définition d'une base locale (dite normale) associée à l'interface, dont les premiers vecteurs \vec{a}_1 et \vec{a}_2 sont tangents et le troisième, \vec{a}_3 , est unitaire et normal.

La valeur de la courbure moyenne H de la surface en un point est obtenue à partir des courbures $\frac{1}{R_1}$, $\frac{1}{R_2}$ et normales \vec{n}_1 , \vec{n}_2 respectives de Frenet, de deux courbes appartenant à la surface se coupant au point considéré, coplanaires à \vec{a}_3 en ce point, et orthogonales entre elles. La relation s'écrit :

$$2 H = \left(\frac{\vec{n}_1}{R_1} + \frac{\vec{n}_2}{R_2} \right) \cdot \vec{a}_3 \quad (3.11)$$

La relation d'Young, qui date de 1805, est beaucoup plus controversée que la loi de Laplace ; elle est supposée traduire l'équilibre de la ligne de séparation des trois phases liquide – gaz – solide (appelée « ligne triple ») sous l'action des trois tensions

σ_{lg} , σ_{sg} , σ_{sl} s'exerçant respectivement sur le plan tangent à chacune des interfaces liquide – gaz, solide – gaz et solide – liquide au point considéré de ligne triple. La projection de cette condition d'équilibre sur le plan tangent au solide s'écrit :

$$\sigma_{lg} \cos \theta = \sigma_{sg} - \sigma_{sl} \quad (3.12)$$

L'angle de mouillage, aussi appelé angle de contact, θ , appartient à l'intervalle $\{0, \pi\}$. Son supplément est extérieur au domaine occupé par le liquide (figure 3.3).

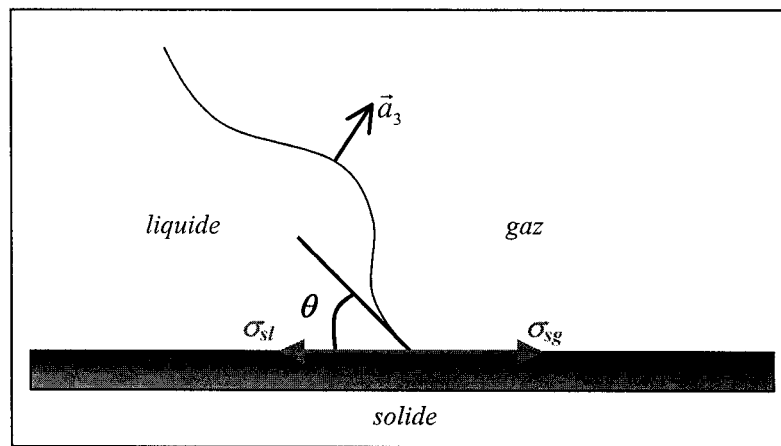


Figure 3.3 : Représentation de l'angle de mouillage θ pour une interface triple liquide – gaz – solide

En toute rigueur, on peut trouver certaines lacunes ⁽²²⁾ à la description physique proposée par la loi d'Young. Ainsi, on est surpris de constater que le terme de courbure moyenne H , introduit dans l'équation de Laplace, disparaît et est remplacé par l'angle de mouillage θ . Le paramètre « étalement », qui intervient le plus spontanément dans la description qualitative de la mouillabilité, n'apparaît pas explicitement. Enfin, il serait intéressant de disposer pour l'équation d'Young d'une variante adaptée aux cas dynamiques, comme pour la relation de Laplace.

Par ailleurs, la mesure de l'angle de mouillage pose beaucoup de problèmes : on trouve souvent dans la littérature une différenciation entre angle apparent mesuré et

angle réel. Il faut aussi citer le problème du phénomène d'hystérésis de l'angle de mouillage suivant une évolution incrémentale de l'interface. Ce phénomène d'hystérésis permet d'affirmer qu'il n'existe pas un seul angle de mouillage caractéristique d'une ligne triple, mais tout un intervalle $[\theta_R, \theta_A]$. θ_R , appelé angle de retrait, correspond à la stabilisation de l'angle de mouillage lorsqu'on diminue le volume d'une goutte posée horizontalement, alors que θ_A , appelé angle d'avancée, correspond à la stabilisation de l'angle de mouillage lorsqu'on augmente le volume d'une goutte posée horizontalement.

Cependant, l'angle de mouillage est le critère le plus couramment utilisé pour déterminer le degré de mouillabilité d'un liquide. On dit qu'un liquide est mouillant par rapport à un substrat solide si $\cos \theta > 0$, c'est-à-dire si $\theta < 90^\circ$, ou encore si $\sigma_{sg} > \sigma_{sl}$ (figure 3.4).

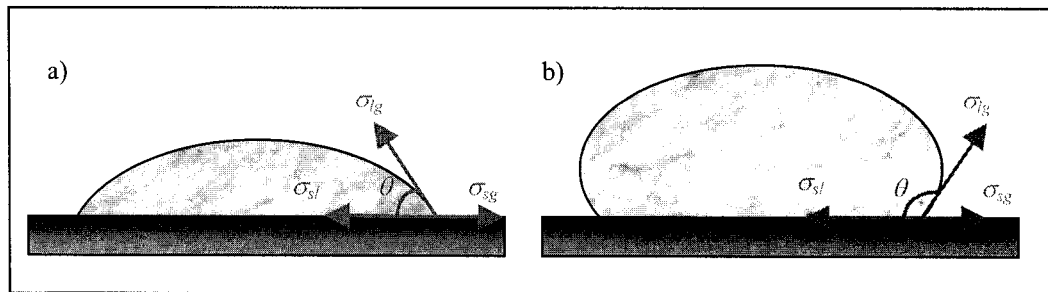


Figure 3.4 : Schématisation d'une goutte posée sur un substrat solide

a) cas d'un liquide mouillant, b) cas d'un liquide non mouillant

En combinant les équations (3.9) et (3.12), on peut exprimer le travail d'adhésion en fonction de l'angle de mouillage par :

$$W_a = \sigma_{lg}(1 + \cos \theta) \quad (3.13)$$

Comme on l'a déjà dit, une valeur élevée du travail d'adhésion est caractéristique d'une interface solide-liquide stable. Lorsqu'un liquide mouille complètement un solide, l'angle de mouillage est nul et le travail d'adhésion devient égal à $2\sigma_{lg}$, une valeur supérieure à $2\sigma_{lg}$ indiquant un étalement spontané du liquide sur le solide. On peut noter que si l'on a un travail d'adhésion élevé, on ne favorise pas la mouillabilité du système, car la tension de surface liquide – gaz devient grande. On doit donc arriver à un compromis entre la mouillabilité et la stabilité de l'interface solide – liquide. Finalement, les deux facteurs à considérer lors de l'étude de la mouillabilité d'un système sont la tension de surface du liquide et l'intensité des forces d'interaction présentes à l'interface solide – liquide, déterminée par le travail d'adhésion.

L'application directe des propriétés de mouillabilité est le phénomène de capillarité, pour lequel les forces d'interaction présentes à l'interface entrent en compétition avec les forces externes, telles que la force de gravité. Considérons une interface liquide – gaz à travers un capillaire (figure 3.5). La différence minimale de pression $\Delta P = P_l - P_g$ requise pour déplacer l'interface de manière isotherme ($dT = 0$) le long du capillaire peut être calculée à partir de l'équation (3.5). On suppose que ce mouvement est trop rapide pour impliquer un transfert de matière entre les phases et l'interface ($dn_i' = dn_i'' = dn_i^s = 0$).

La variation d'énergie libre du système est alors traduite par :

$$dF = -P_l dV_l - P_g dV_g + \sigma_{sl} dA_{sl} + \sigma_{sg} dA_{sg} \leq 0 \quad (3.14)$$

Pour un capillaire cylindrique de rayon R ,

$$dV_l = -dV_g = R dA_{sl} / 2 = -R dA_{sg} / 2 \quad (3.15)$$

Il vient alors :

$$\Delta P = P_l - P_g \geq -2(\sigma_{sg} - \sigma_{sl}) / R \quad (3.16)$$

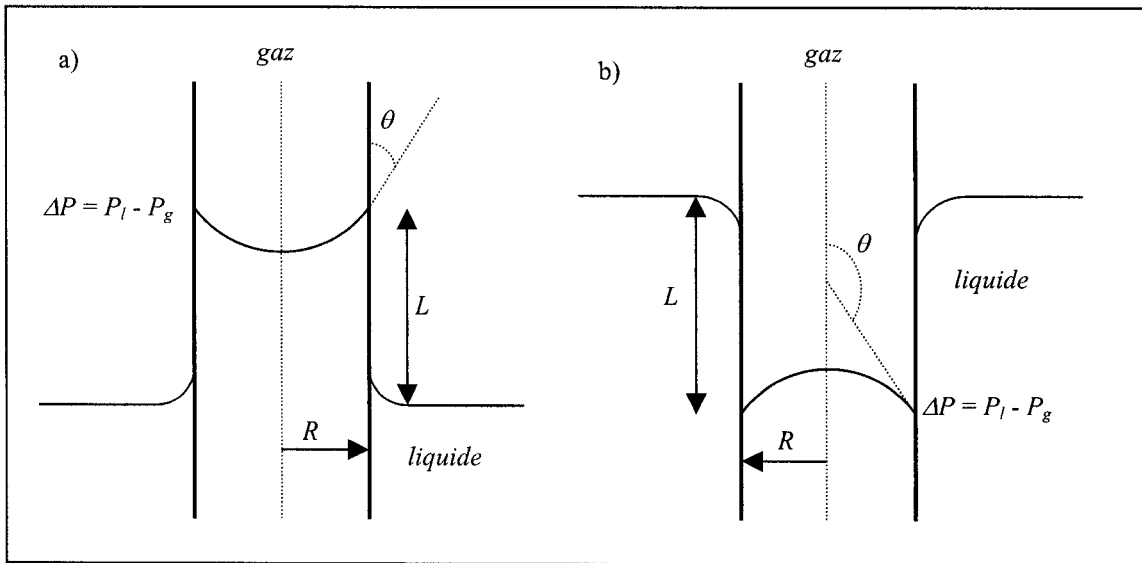


Figure 3.5 : configuration géométrique d'un liquide dans un tube capillaire

a) cas du liquide mouillant, b) cas du liquide non mouillant

En utilisant la relation de Young (3.12), on trouve une expression de la différence de pression à l'interface liquide – gaz en fonction de l'angle de mouillage :

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{lg} \cos \theta}{R} \quad (3.17)$$

En combinant avec l'expression de la pression exercée par la force de gravité sur une colonne de fluide de longueur L ($\Delta P = \rho g L$), on obtient la loi de capillarité, aussi appelée loi de Jurin :

$$L = \frac{2\sigma_{lg} \cos \theta}{\rho g R} \quad (3.18)$$

La loi de capillarité donne la profondeur de pénétration L du liquide dans un capillaire vertical de rayon R . On voit donc que les deux contributions au transport de matière sont la force de gravité et la force capillaire (liée à la mouillabilité). Il faut cependant remarquer que la validité de cette loi dépend de la mouillabilité du liquide par rapport à la surface avec laquelle il est en contact. Pour un liquide mouillant, une chute

de pression ΔP va se produire à la surface du liquide entraînant une succion du liquide, et par conséquent une pénétration spontanée. Dans ce cas, la loi de capillarité (3.18) est parfaitement valide.

Cependant, si le liquide n'est pas mouillant, l'énergie de surface recouvrant le liquide devient supérieure à l'énergie de la surface en contact avec l'atmosphère. L'angle θ est alors supérieur à 90° et $\cos \theta$ est négatif. Selon l'équation (3.17), il se produit une augmentation de pression à la surface du liquide et la pénétration spontanée dans le tube capillaire n'est plus possible : la loi de capillarité n'est plus valide. En réalité, elle ne donne plus que la valeur négative de la distance de rejet du liquide du tube capillaire, si l'extrémité du tube est immergée (voir la figure 3.5-b). Pour qu'il y ait pénétration, on doit exercer une pression supplémentaire sur le liquide, qui puisse au moins compenser cette hausse de pression superficielle. La pression P_{app} à appliquer, pour le tube capillaire de rayon R , est donc :

$$P_{app} \geq \frac{2\sigma_{lg} \cos \theta}{R} \quad (3.18)$$

De plus, si la pression supplémentaire P_{app} est juste assez suffisante pour qu'il y ait pénétration dans le tube capillaire de rayon R , elle ne le sera pas pour un tube de rayon inférieur, dans lequel la hausse de pression superficielle sera plus importante. On peut alors définir, grâce à l'angle de mouillage, un rayon maximal R_{max} du tube capillaire pour qu'il n'y ait pas de pénétration du liquide dans le tube capillaire :

$$R_{max} = \frac{2\sigma_{lg} \cos \theta}{P_{app}} \quad (3.19)$$

De nombreux résultats ⁽⁴²⁾ ont prouvé que les métaux liquides en contact avec les matériaux réfractaires peuvent infiltrer les structures poreuses de ceux-ci par capillarité. Ainsi, une première approximation dans le travail de modélisation de la cinétique d'infiltration des réfractaires par un métal liquide est de considérer la structure poreuse des réfractaires comme un ensemble de tubes capillaires. C'est un modèle fréquemment

utilisé par les réfractairistes ^(11, 14), qui permet de donner déjà des indications précieuses dans l'étude de l'infiltration des matériaux fondus dans les réfractaires.

Dans la suite de notre analyse, nous allons donc assimiler les pores de réfractaires à des tubes capillaires. Nous avons déjà vu que le transport de matière liquide dans ces pores idéalisés faisait intervenir, par l'intermédiaire de la loi de capillarité, deux paramètres : la capillarité et la gravité. En réalité, le rôle de la capillarité dans l'infiltration du métal liquide est secondaire, car le facteur essentiel qui régit l'infiltration n'est pas tant la mouillabilité que la viscosité du liquide. Dès lors, l'infiltration du liquide va dépendre des forces capillaires, de la gravité, mais aussi de la viscosité du liquide et de la pression métallostatique.

3.2. INFLUENCE DE LA VISCOSITÉ ET DE LA PRESSION MÉTALLOSTATIQUE

3.2.1. L'écoulement visqueux

Nous devons donc trouver une nouvelle expression de la profondeur d'infiltration, qui tient aussi compte de l'écoulement visqueux du liquide. Puisque le pore est assimilé à un tube, on peut se placer en coordonnées cylindriques z , r et θ , comme c'est indiqué sur la figure 3.6. L'écoulement du fluide se produit dans la direction z et la vitesse du fluide est donc notée v_z . La vitesse du fluide en contact avec la paroi interne du tube de rayon R est nulle, et donc, par symétrie, v_z a une valeur maximale sur l'axe central du tube (c'est-à-dire à $r = 0$). Comme la valeur de v_z augmente en allant de la paroi vers l'axe central, un moment visqueux, produit par la contrainte de cisaillement τ_{rz} , est transporté radialement de l'axe central vers la paroi. Les indices de τ_{rz} indique que le moment visqueux est transporté dans la direction r , suite à l'écoulement du fluide dans la direction z .

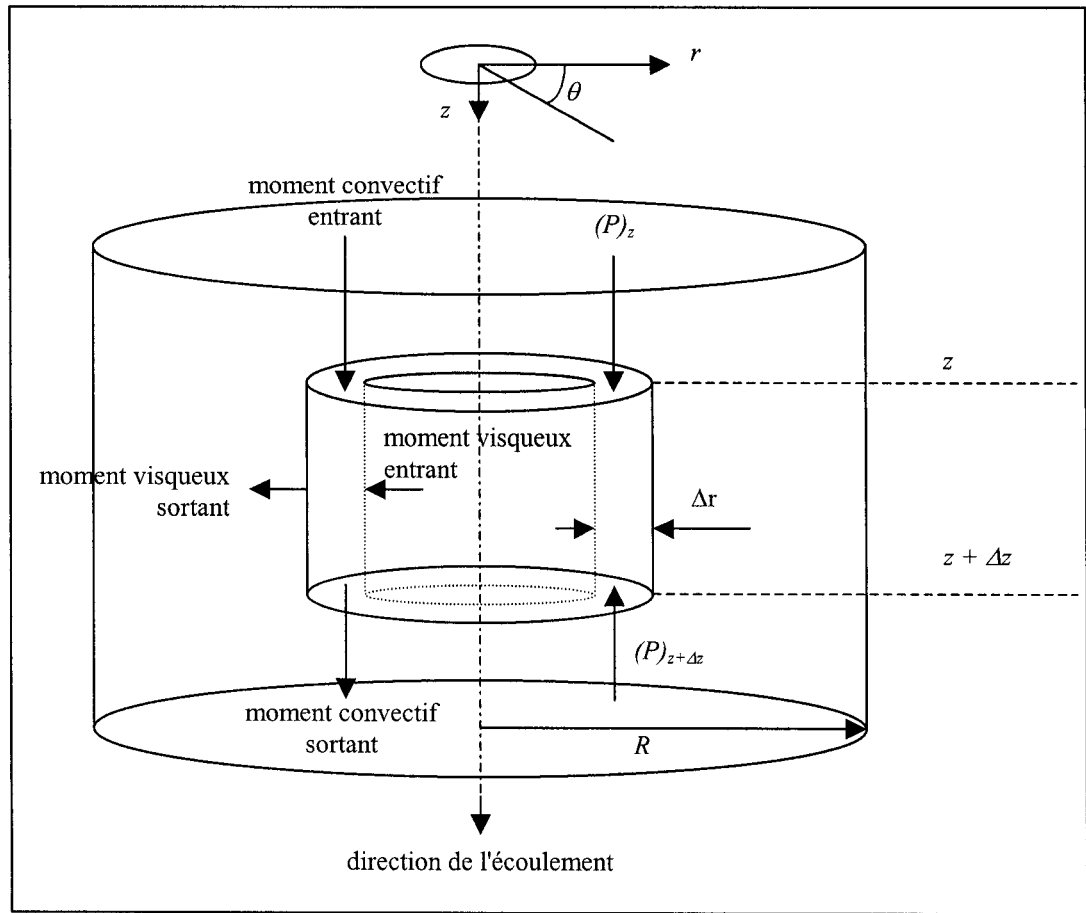


Figure 3.6 : Élément de volume d'un fluide s'écoulant dans un tube vertical

L'élément de volume, localisé suffisamment loin de l'entrée du tube, tel qu'un écoulement laminaire ait lieu dans le tube, est une coquille cylindrique de longueur Δz , de rayon intérieur r , de rayon extérieur $r + \Delta r$, et de volume $2\pi r \Delta r \Delta z$. Comme on considère dans un premier temps un tube vertical, l'écoulement se fait dans la direction z . Le moment convectif entre au travers de la surface supérieure à la vitesse de $(\rho v_z^2)_z \cdot 2\pi r \Delta r$ et sort à travers la surface inférieure à la vitesse $(\rho v_z^2)_{z+\Delta z} \cdot 2\pi r \Delta r$. Le moment visqueux entre dans l'élément de volume par la surface intérieure à la vitesse $(\tau_{rz} \cdot 2\pi r \Delta z)_r$ et sort par la surface extérieure à la vitesse $(\tau_{rz} \cdot 2\pi r \Delta z)_{r+\Delta r}$. L'influence de la gravité sur l'écoulement vertical du fluide est telle que le fluide dans l'élément de

volume est soumis à la force gravitationnelle sur son propre poids, $\rho g.2\pi r\Delta r\Delta z$, et si le fluide est aussi influencé par la force appliquée, cette contribution au bilan de force est $(P)_z.2\pi r\Delta r$ dans la direction de l'écoulement au niveau z et $(P)_{z+\Delta z}.2\pi r\Delta r$ dans le sens opposé à l'écoulement au niveau $z + \Delta z$.

Le bilan de moment dans l'élément de volume est alors :

$$(\rho v_z^2|_z - \rho v_z^2|_{z+\Delta z})2\pi r\Delta r + (\tau_{rz}.2\pi r\Delta z)|_r - (\tau_{rz}.2\pi r\Delta z)|_{r+\Delta r} + (P|_z - P|_{z+\Delta z})2\pi r\Delta r + \rho g.2\pi r\Delta r\Delta z = 0 \quad (3.20)$$

Comme l'écoulement se fait en régime permanent, v_z dépend seulement de r , donc $v_z|_z = v_z|_{z+\Delta z}$, et le premier terme devient nul.

En divisant par $\Delta r.\Delta z$ et 2π , on obtient :

$$\frac{(r\tau_{rz})|_r - (r\tau_{rz})|_{r+\Delta r}}{\Delta r} + \frac{(P|_z - P|_{z+\Delta z})r}{\Delta z} + \rho gr = 0 \quad (3.21)$$

Dans le cas limite où Δr et $\Delta z \rightarrow 0$, l'expression devient :

$$\frac{d(r\tau_{rz})}{dr} - \frac{dP}{dz}r + \rho gr = 0 \quad (3.22)$$

Comme $-dP/dz = \Delta P/L$ (diminution de la pression statique qui a lieu sur la longueur L du tube), on a :

$$\frac{d(r\tau_{rz})}{dr} = \left(\frac{\Delta P}{L} + \rho g \right) r \quad (3.23)$$

Une première intégration donne :

$$r\tau_{rz} = \left(\frac{\Delta P}{L} + \rho g \right) \frac{r^2}{2} + C_1 \quad (3.24)$$

Puisque $\tau_{rz} = 0$ à $r = 0$ ($dv_z/dr = 0$ à $r = 0$), $C_1 = 0$ et donc :

$$\begin{aligned} \tau_{rz} &= \left(\frac{\Delta P}{L} + \rho g \right) \frac{r}{2} \\ &= -\eta \frac{dv_z}{dr} \end{aligned} \quad (3.25)$$

La deuxième partie de l'équation (3.25) provient de la loi de viscosité de Newton, dans laquelle η est la viscosité dynamique du métal liquide. En effet, un métal liquide peut être assimilé à un fluide newtonien ⁽¹⁵⁾.

Une deuxième intégration donne ensuite :

$$v_z = -\left(\frac{\Delta P}{l} + \rho g\right) \frac{r^2}{4\eta} + C_2 \quad (3.26)$$

Puisque $v_z = 0$ à $r = R$,

$$C_2 = \left(\frac{\Delta P}{l} + \rho g\right) \frac{R^2}{4\eta} \quad (3.27)$$

et donc :

$$v_z = \left(\frac{\Delta P}{l} + \rho g\right) \frac{R^2 - r^2}{4\eta} \quad (3.28)$$

La distribution de v_z est alors un paraboloïde, et la valeur maximale de v_z est :

$$v_{z,\max} = \left(\frac{\Delta P}{l} + \rho g\right) \frac{R^2}{4\eta} \quad (3.29)$$

La valeur moyenne de la vitesse d'écoulement v_z est telle que le volume du cylindre $\bar{v}_z \pi R^2$ soit égal au volume du paraboloïde :

$$\begin{aligned} \bar{v}_z \pi R^2 &= \int_0^{2\pi} \int_0^R v_z r dr d\theta \\ &= 2\pi \int_0^R \left(\frac{\Delta P}{l} + \rho g\right) \frac{R^2 - r^2}{4\eta} r dr \\ &= 2\pi \frac{\Delta P/l + \rho g}{4\eta} \left[\frac{R^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^R \\ &= 2\pi \left(\frac{\Delta P}{l} + \rho g\right) \frac{R^4}{16\eta} \end{aligned}$$

Ou encore :

$$\bar{v} = \left(\frac{\Delta P}{l} + \rho g\right) \frac{R^2}{8\eta} \quad (3.30)$$

ce qui est la moitié de la valeur de v_{\max} . Le débit volumique est alors:

$$\dot{V} = \bar{v}_z \pi R^2 = \pi \left(\frac{\Delta P}{l} + \rho g \right) \frac{R^4}{8\eta} \quad (3.31)$$

L'équation (3.31) est appelée équation de Hagen-Poiseuille.

Il est intéressant, à ce niveau de notre analyse, de mettre en évidence l'analogie entre la relation de Hagen-Poiseuille (3.31) et la loi empirique de Darcy, et ainsi de montrer le lien microscopique – macroscopique qui unissent ces deux relations. La loi de Darcy a permis, dès 1856, de mesurer la résistance à l'écoulement d'un fluide traversant un milieu poreux. Cette loi s'exprime de la manière suivante, pour un fluide incompressible traversant un milieu poreux d'épaisseur L :

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{P_i - P_0}{L} = \frac{\eta}{k_1} v_s \quad (3.32)$$

où P_i et P_0 représentent respectivement les valeurs absolues de la pression mesurées à l'entrée et à la sortie du milieu, η est la viscosité dynamique du fluide et k_1 est une constante associée au milieu poreux et appelée coefficient de perméabilité, perméabilité intrinsèque ou perméabilité darcienne.

Pour les fluides compressibles, tels que les gaz, l'équation (3.32) peut s'écrire, en considérant que le fluide en question est un gaz idéal :

$$\frac{P_i^2 - P_0^2}{2PL} = \frac{\eta}{k_1} v_s \quad (3.33)$$

où P est la pression pour laquelle les valeurs de vitesse et de viscosité du fluide sont obtenues.

Si l'on reprend l'équation de Hagen-Poiseuille (3.31), et si l'on omet le terme de gravité ρg , cette équation devient :

$$v_z = \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \frac{R^2}{8\eta} \quad (3.34)$$

Soit encore :

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(\frac{8}{R^2} \right) \eta \cdot v_z \quad (3.35)$$

Si la vitesse moyenne d'écoulement v_z du fluide est proportionnelle à sa vitesse de surface v_s , on constate que la relation (3.35) devient équivalente à la loi de Darcy (3.32) pour un fluide incompressible. En effet, le coefficient de perméabilité k_l est proportionnel au rayon équivalent R_c^2 . De nombreuses tentatives ont été faites pour trouver une relation déterministe entre k_l et R_c^2 en fonction de paramètres tels que la porosité, la surface accessible de l'extérieur par unité de volume, le diamètre caractéristique, la tortuosité τ et le facteur de formation F . Ainsi, Thompson et al. ⁽³⁷⁾ ont proposé une relation permettant de corréliser k_l et R_c^2 avec un certain succès :

$$k_l = \frac{1}{56,5} \frac{R_c^2}{F} \quad (3.36)$$

La loi de Darcy montre une bonne adéquation avec les résultats expérimentaux, lorsque la chute de pression résulte des effets visqueux à faibles vitesses. Cependant, lorsque la vitesse augmente, des effets cinétiques provenant de l'inertie du fluide et des phénomènes de turbulence deviennent significatifs ⁽¹⁸⁾, et on doit dès lors concevoir une relation de type parabolique entre ΔP et v_s . Dans le cas des gaz, on peut écrire :

$$\frac{P_i^2 - P_0^2}{2PL} = \frac{\eta}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (3.37)$$

où ρ est la densité du fluide.

L'équation (3.34) est appelée équation de Forchheimer, et la nouvelle constante k_2 , qui dépend uniquement des propriétés du milieu poreux, est appelée perméabilité non-darcienne. Cette relation est assimilable à celle proposée par H.C. Brinkman ⁽¹⁵⁾, qui comprend aussi un terme quadratique représentant les effets d'inertie.

Afin d'estimer l'importance du terme inertiel dans la perméabilité des milieux poreux, Innocentini et al. ⁽¹⁸⁾ ont introduit le nombre de Forchheimer (Fo).

$$Fo = \frac{\rho v_s}{\eta} \left(\frac{k_1}{k_2} \right) \quad (3.38)$$

Le paramètre Fo représente le rapport entre les forces visqueuses et les forces cinétiques, contribuant à la chute de pression du fluide. Lorsque $Fo \ll 1$, la déviation est négligeable et l'équation de Forchheimer se réduit à la loi de Darcy. Mais si $Fo = 1$, l'omission du terme quadratique dans l'équation de Forchheimer provoque une déviation de 50 % dans la chute de pression. En intégrant le nombre de Forchheimer dans l'équation (3.34), Innocentini et al. ont pu mesurer l'importance relative des effets d'inertie pour différents matériaux poreux. Dans le cas des bétons auto-coulants à forte teneur en alumine, la déviation atteint 40.9 % pour un écoulement d'air à la vitesse de $27.3 \cdot 10^{-5}$ m/s, ce qui est loin d'être négligeable. Cependant, lorsque la vitesse du fluide diminue, l'importance des effets d'inertie est beaucoup moins marquée : la déviation n'est plus que de 2.2 % pour une vitesse de $0.9 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Comme l'infiltration du métal liquide dans un réfractaire est relativement lente (faibles vitesses), on est en droit de se demander si l'on doit prendre en compte les effets d'inertie dans la cinétique d'infiltration. A priori, pour les vitesses d'infiltration mesurées expérimentalement, les effets d'inertie peuvent être négligés. Cependant, selon Innocentini et al. ⁽¹⁹⁾, les effets d'inertie sont plus importants pour les liquides que pour les gaz, ce qui explique les différences dans les mesures de perméabilité suivant le fluide utilisé. Le nombre de Forchheimer Fo est ainsi 20 fois plus élevé pour un écoulement d'eau que pour un écoulement d'air. On peut donc supposer que, dans le cas de l'aluminium liquide, les effets d'inertie seront plus importants que pour un simple écoulement d'air. Par ailleurs, Innocentini prétend que les effets d'inertie (et donc la constante de perméabilité non-darcienne k_2) sont liés à la tortuosité moyenne de la porosité ⁽³²⁾. Donc les effets d'inertie vont aussi dépendre de la façon dont le matériau réfractaire a été conçu. En effet, la température de cuisson ⁽³²⁾, la distribution en taille des particules et la teneur en eau des bétons ⁽²⁰⁾ vont modifier la morphologie des pores. Suite à l'apparition de microfissures (dues à la dilatation thermique) et à l'effet de

« paroi » (dû à l'hydratation des fines particules), il peut ainsi se créer des pores moins tortueux à l'interface grain-matrice, et donc il y aura diminution des effets d'inertie. Enfin, des essais à haute température ont permis de mettre en évidence le fait que les effets d'inertie sont plus importants lorsque la température du fluide augmente ⁽²¹⁾. Ces trois constats permettent de conclure que les effets d'inertie peuvent constituer des paramètres non négligeables dans une cinétique d'infiltration d'un métal liquide dans un réfractaire. Nous nous efforcerons d'analyser la pertinence de cette affirmation en section 5.

3.2.2. Cinétique de pénétration d'un tube capillaire

Connaissant désormais la cinétique d'écoulement d'un fluide visqueux, il nous est possible de déterminer la cinétique de ce fluide dans un tube capillaire.

Prenons tout d'abord le cas pour lequel le liquide s'écoule dans un pore assimilé à un tube capillaire horizontal. Comme il n'y a pas de changement de l'énergie potentielle de pesanteur, la contribution de la force de pesanteur, dans le bilan de forces, est nulle. L'équation de Hagen-Poiseuille (3.31) peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$\dot{V} = \frac{\pi R^4}{8\eta} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = \pi R^2 \frac{dL}{dt} \quad (3.39)$$

Ou encore, en exprimant la vitesse d'avancement dL/dt du front de pénétration (assimilable à la vitesse moyenne du fluide) :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{R^2}{8\eta} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \quad (3.40)$$

En multipliant par L (profondeur de pénétration du métal liquide dans le pore) et en divisant par dt , on obtient :

$$\frac{L}{\Delta P} dL = \frac{R^2}{8\eta} dt \quad (3.41)$$

L'équation (3.17) permet de substituer la chute de pression ΔP par la contribution des forces de capillarité, dans le cas d'un liquide mouillant. On trouve alors :

$$\left(\frac{L}{\frac{2\sigma_{lg} \cos \theta}{R}} \right) dL = \frac{R^2}{8\eta} dt$$

Soit :

$$L dL = \frac{R\sigma_{lg} \cos \theta}{4\eta} dt \quad (3.42)$$

En posant $\chi = \frac{\sigma_{lg} \cos \theta}{2\eta}$, χ étant un facteur caractéristique du liquide,

$$L dL = R \frac{\chi}{2} dt \quad (3.43)$$

Après intégration, en supposant que χ et R sont des constantes :

$$\frac{L^2}{2} = R \frac{\chi}{2} t \quad (3.44)$$

On obtient finalement une expression de la profondeur de pénétration, dans le cas où le pore est assimilé à un tube capillaire horizontal.

$$L = \sqrt{R\chi t} \quad (3.45)$$

On voit que l'infiltration est d'autant plus profonde que les pores sont plus gros (plus grand rayon R). On arrive donc à un résultat opposé à celui prédit par la loi de capillarité (3.18), et de plus vérifié par l'expérience ⁽¹⁴⁾.

Cette expression est cependant discutable si le liquide est de l'aluminium fondu infiltrant un réfractaire, car l'hypothèse, selon laquelle χ et R sont des constantes, n'est pas forcément vérifiée dans la réalité : l'infiltration du réfractaire par le métal est en général accompagnée de réactions chimiques (voir la section 2.1), avec production de nouvelles espèces chimiques. Il s'ensuit des changements dans les propriétés physiques du liquide (viscosité, angle de contact, tension superficielle, rayon du pore) et la profondeur de pénétration donnée dans l'équation (3.45) n'est alors plus valide...

Considérons maintenant le cas général où la direction d'écoulement dans le tube représentant le pore fait un angle β avec la direction de la force de pesanteur (figure 3.7).

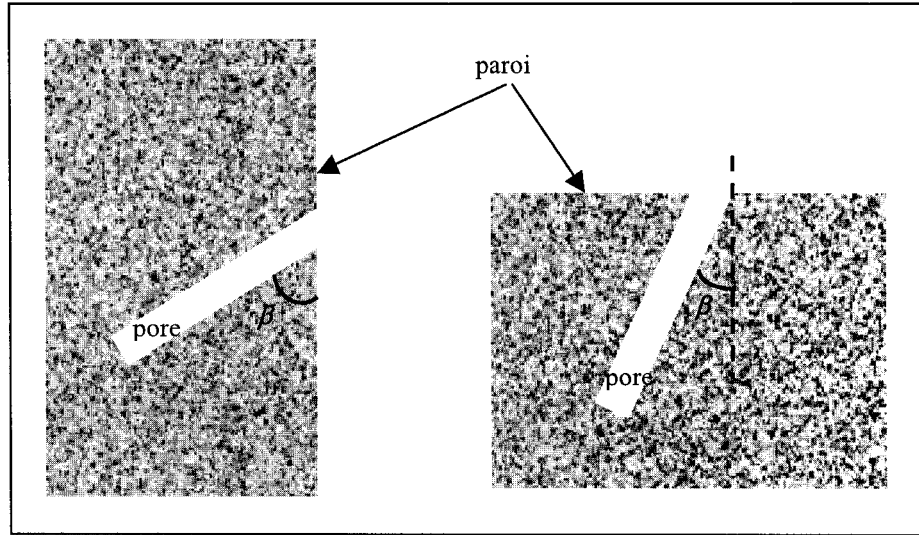


Figure 3.7 : exemples de configuration géométrique du pore par rapport à la paroi

Reprenons encore une fois l'équation de Hagen-Poiseuille (3.31), pour laquelle le liquide s'écoule de haut en bas :

$$\dot{V} = \overline{v_z} \pi R^2 = \pi \left(\frac{\Delta P}{L} + \rho g \right) \frac{R^4}{8\eta} \quad (3.31)$$

Si l'on prend en considération l'angle β , l'équation devient :

$$\dot{V} = \overline{v_z} \pi R^2 = \pi \left(\frac{\Delta P}{L} + \rho g \cos \beta \right) \frac{R^4}{8\eta} \quad (3.46)$$

On voit que si l'écoulement se fait dans la même direction que la force de pesanteur ($\beta = 0^\circ$), on retrouve l'équation (3.31). De plus, si l'écoulement se fait perpendiculairement à la direction de la force de pesanteur (tube horizontal et $\beta = \pm 90^\circ$), on retrouve l'équation (3.39).

Par ailleurs, la présence d'un bain de métal liquide au contact du pore peut influencer l'infiltration du métal dans le pore par l'action de la pression qu'exerce le bain sur la paroi en réfractaire. Cette pression est donnée par l'équation de Bernouilli (bilan d'énergie) :

$$\Delta P_b = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (z_2 - z_1) \quad (3.47)$$

où les indices 1 et 2 font référence respectivement aux sections d'entrée et de sortie du fluide dans la conduite.

Si l'on suppose que la contribution du bain dans le processus d'infiltration du réfractaire est négligeable en termes d'énergie cinétique, la pression exercée par le bain sur la paroi provient alors seulement de son propre poids.

Soit h_0 la hauteur du bain et h la distance entre le fond du bain et la position de la section d'entrée du pore sur la paroi (voir figure 3.8). On a donc :

$$\Delta P_b = \rho g (h_0 - h) \quad (3.48)$$

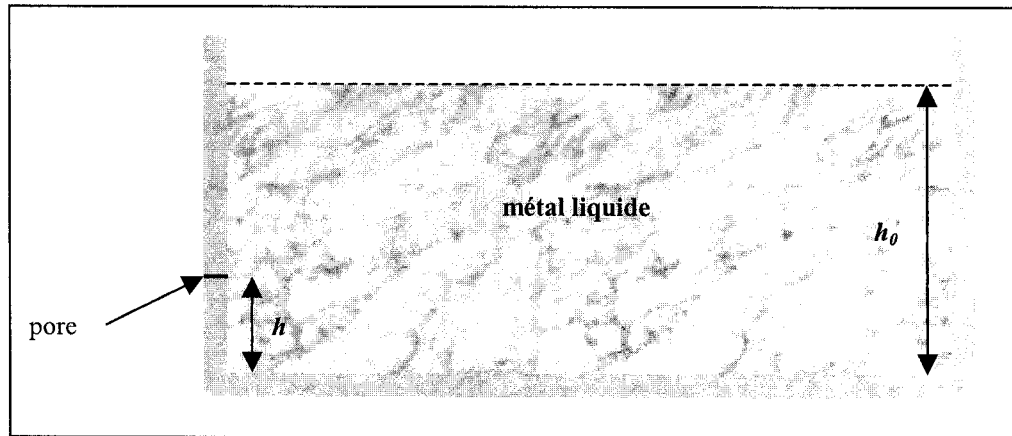


Figure 3.8 : Position du pore par rapport au bain métallique

Finalement, en rapportant cette expression à la profondeur de pénétration L , et en l'incorporant à l'équation de Hagen-Poiseuille (3.46), on obtient :

$$\dot{V} = \bar{v}_z \pi R^2 = \pi \left(\frac{\Delta P}{L} + \frac{\rho g (h_0 - h)}{L} + \rho g \cos \beta \right) \frac{R^4}{8\eta} \quad (3.49)$$

La vitesse moyenne du fluide dans le pore est alors :

$$\overline{v_z} = \left(\frac{\Delta P}{L} + \frac{\rho g(h_0 - h)}{L} + \rho g \cos \beta \right) \frac{R^2}{8\eta}$$

La vitesse d'avancement dL/dt du front de pénétration, assimilable à la vitesse moyenne, s'écrit :

$$\frac{dL}{dt} = \left(\frac{\Delta P}{L} + \frac{\rho g(h_0 - h)}{L} + \rho g \cos \beta \right) \frac{R^2}{8\eta} \quad (3.50)$$

Comme précédemment, l'équation (3.17) permet de substituer la chute de pression ΔP par la contribution des forces de capillarité, dans le cas d'un métal liquide mouillant.

On trouve alors:

$$\frac{dL}{dt} = \left(\frac{2\sigma_{lg} \cos \theta}{RL} + \frac{\rho g(h_0 - h)}{L} + \rho g \cos \beta \right) \frac{R^2}{8\eta} \quad (3.51)$$

On peut poser :

$$K_c = \frac{2\sigma_{lg} \cos \theta}{R} \quad (3.51)$$

$$K_p = \rho g(h_0 - h) \quad (3.52)$$

K_c est la contribution de la capillarité et K_p est la contribution de la pression métallogstatique. La pression $\rho g(h_0 - h)$ exercée par le bain sur le pore joue le rôle de pression additionnelle permettant la pénétration par capillarité dans le cas où le liquide n'est pas mouillant, pour un rayon minimum de pore $R > R_{max}$ (voir section 3.1.2).

$$K_g = \rho g \cos \beta \quad (3.53)$$

K_g est la contribution de la gravité exercée sur le métal infiltré.

$$K_v = \frac{R^2}{8\eta} \quad (3.54)$$

K_v est la contribution de la viscosité.

On peut remarquer que, si on annule l'action de la pesanteur ($K_g = 0$), on retrouve l'expression (3.42) pour le cas du tube capillaire horizontal.

L'équation (3.51) devient donc :

$$\frac{dL}{dt} = \left(\frac{K_c + K_p}{L} + K_g \right) K_v \quad (3.55)$$

Soit :

$$\frac{L dL}{(K_c + K_p + K_g L)} = K_v dt$$

Passons à l'intégration de cette expression :

$$\int_0^L \frac{L dL}{K_c + K_p + K_g L} = \int_0^t K_v dt \quad (3.56)$$

En supposant que K_c , K_p , K_g et K_v sont des constantes, on trouve :

$$\frac{1}{K_g^2} \left[K_c + K_p + K_g L - K_c \ln(K_c + K_p + K_g L) \right]_0^L = K_v [t]_0^t \quad (3.57)$$

Soit :

$$\begin{aligned} K_v t &= \frac{1}{K_g^2} \left[K_c + K_p + K_g L - K_c \ln(K_c + K_p + K_g L) - K_c - K_p + (K_c + K_p) \ln(K_c + K_p) \right] \\ &= \frac{1}{K_g^2} \left[K_g L + (K_c + K_p) \ln \left(\frac{K_c + K_p}{K_c + K_p + K_g L} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.58)$$

Si l'on considère que la contribution de la gravité K_g est infime ($K_g \rightarrow 0$), on peut procéder à un développement limité du deuxième ordre sur le second terme de l'équation (3.57). On a alors :

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_g^2} \left[K_g L + (K_c + K_p) \ln \left(\frac{K_c + K_p}{K_c + K_p + K_g L} \right) \right] \\ \approx \frac{1}{K_g^2} \left[K_g L - (K_c + K_p) \frac{K_g L}{(K_c + K_p)} + (K_c + K_p) \frac{K_g^2 L^2}{2(K_c + K_p)^2} \right] \\ = \frac{l^2}{2K_c} \end{aligned} \quad (3.59)$$

Et l'équation (3.58) devient, dans ce cas,

$$\frac{L^2}{2(K_c + K_p)} = K_v t$$

Ou encore :

$$L = \sqrt{2(K_c + K_p)K_v t} \quad (3.60)$$

On voit que, dans le cas où l'on omet la pression exercée par le bain de métal liquide ($K_p = 0$), l'expression (3.60) est identique à l'expression (3.45), donnée pour le cas du tube capillaire horizontal, en l'absence de pression extérieure.

De même, si on se place à l'équilibre, c'est-à-dire si on est en conditions statiques, la vitesse d'avancement de front de pénétration dL/dt sera nulle. À partir de l'équation (3.55), on obtient donc :

$$\frac{dL}{dt} = 0 = \left(\frac{K_c + K_p}{L} + K_g \right) K_v$$

Soit :

$$\frac{K_c + K_p}{L} + K_g = 0$$

Ou encore :

$$L = -\frac{K_c + K_p}{K_g} \quad (3.61)$$

Maintenant, si l'on reprend la configuration proposée dans la figure 3.6, on place l'entrée du tube à la surface du liquide, ce qui signifie que $h = h_0$. Si le liquide est mouillant, les forces de capillarité vont entraîner une pénétration du liquide dans le tube. Comme cette pénétration se fait de bas en haut, $\cos \beta = -1$. On finit donc par retrouver la loi de capillarité (3.18).

On a ainsi obtenu une loi générale de pénétration, donnant le temps t nécessaire pour que la pénétration dans le tube capillaire se fasse sur la profondeur L .

$$t = \frac{1}{K_v K_g^2} \left[K_g L + (K_c + K_p) \ln \left(\frac{K_c + K_p}{K_c + K_p + K_g L} \right) \right] \quad (3.62)$$

On voit que cette loi de pénétration est influencée par trois paramètres : la capillarité, la viscosité et la gravité. Toutefois, la viscosité ne joue que le rôle d'un facteur limitant par rapport à la pénétration du métal liquide, alors que la capillarité et la gravité contrôlent réellement cette pénétration (leurs proportions relatives dans le processus de pénétration va déterminer les conditions de pénétration).

On a vu que cette expression est applicable à des cas particuliers, tels que ceux vus précédemment (loi de capillarité, tube horizontal sans pression extérieure). Cependant, comme on l'a vu dans le cas de la loi de capillarité (section 3.1.2), la condition de pénétration par capillarité est soumise à la propriété mouillante du liquide. Si le liquide n'est pas mouillant par rapport à la surface sur lequel il est déposé, les forces de capillarité seront opposées à l'action de pénétration. Il est alors nécessaire de produire une pression extérieure, afin de forcer le liquide à pénétrer dans le tube. Dans le cas de la loi générale de pénétration, la pression exercée par le bain de métal liquide sur la paroi de réfractaire peut se substituer à cette pression extérieure.

Rappelons que, si le liquide n'est pas mouillant, la pénétration aura lieu dans les pores dont le rayon sera supérieur à R_{max} .

$$R_{max} = \frac{2\sigma_{lg} \cos\theta}{\Delta P_e} \quad (3.19)$$

Si la pression extérieure ΔP_e correspond à la pression exercée par le bain sur la paroi, on trouve la condition de pénétration pour un liquide non mouillant, dans le cas de la loi générale :

$$R > \frac{2\gamma_{lg} \cos\theta}{\rho g(h - h_0)} \quad (3.63)$$

Cette condition de pénétration peut aussi se mettre sous la forme suivante :

$$K_c + K_p > 0 \quad (3.64)$$

Si cette condition de pénétration est satisfaite, le métal liquide va pénétrer dans le pore. Mais, comme on l'a signalé précédemment, il existe un couplage entre la contribution de la capillarité et de la pression externe ($K_c + K_p$) et la contribution de la gravité K_g , contrôlant l'action de pénétration. Suivant la situation, la pénétration peut s'arrêter au bout d'un moment (lorsque la force de pesanteur s'oppose à l'écoulement du fluide dans le pore), ou bien continuer indéfiniment (lorsque la force de pesanteur promeut l'écoulement du fluide dans le pore). Il est alors nécessaire de définir une deuxième condition, appelée condition d'infiltration.

Dans le cas où la force de pesanteur s'oppose à l'écoulement, puisque $(K_c + K_p) > 0$ (condition de pénétration), on trouve $K_g < 0$. En d'autres termes, $\cos \beta < 0$, ce qui signifie que l'angle β que fait le pore (assimilé à un tube) avec la direction verticale (de haut en bas) est inférieur à -90° ou supérieur à $+90^\circ$. Le fluide doit fournir un effort pour s'écouler dans le pore, c'est-à-dire pour s'élever. Cet effort provient des forces de capillarité et/ou de la pression métallostatique. L'écoulement se traduit par :

$$\frac{dL}{dt} > 0 \quad (3.65)$$

Ou encore, d'après l'équation (3.55), et comme on a toujours $K_v > 0$,

$$\frac{K_c + K_p}{L} + K_g > 0$$

Soit :

$$L < -\frac{K_c + K_p}{K_g} \quad (3.66)$$

Cette expression est la condition d'infiltration, donnant la profondeur de pénétration maximale dans le cas où le métal liquide doit s'élever pour s'écouler dans le pore assimilé à un tube capillaire. Cette condition d'infiltration a une grande importance, particulièrement si, pour le pore considéré, la contribution duale de la capillarité K_c et de la pression métallostatique K_p est faible (cas où la pression exercée par le bain

métallique sur la paroi compense juste assez la pression capillaire pour un liquide non mouillant).

La condition d'infiltration peut aussi s'écrire :

$$L < -\frac{1}{\cos \beta} \left[\frac{2\sigma_{lg} \cos \theta}{\rho g R} + (h_0 - h) \right] \quad (3.67)$$

Il nous est donc maintenant possible d'estimer la profondeur de pénétration d'un liquide dans un pore représenté par un tube capillaire... Prenons l'exemple du système Al_2O_3 - Al, à 800°C . On utilise les valeurs suivantes :

$$\sigma_{lg} = 483 \text{ dynes/cm} = 0.483 \text{ N/m}$$

$$\theta = 113^\circ$$

$$\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$$

$$h_0 = 1 \text{ m}$$

$$\beta = 80^\circ$$

$$\eta = 0.102 \text{ Pa.s}$$

On voit que l'angle de mouillage θ est supérieur à 90° , ce qui signifie que l'aluminium liquide pour ce système n'est pas mouillant. Deux paramètres vont alors contrôler la condition de pénétration : la taille du pore (c'est-à-dire le rayon du cylindre) et la position de la section d'entrée du pore par rapport au bain métallique. La figure 3.9 montre le profil du front de pénétration pour un rayon de $30 \mu\text{m}$ et pour différents temps d'infiltration. On voit clairement qu'il n'y a pas de pénétration du métal à la surface du bain, alors que la pression en fond de cuve provoque une infiltration importante du pore. La figure 3.10 montre aussi le profil de pénétration, mais pour des rayons différents, à un moment donné. On distingue, pour chacun des profils, la profondeur correspondant à la limite de pénétration (au-dessus de laquelle il n'y a pas de pénétration).

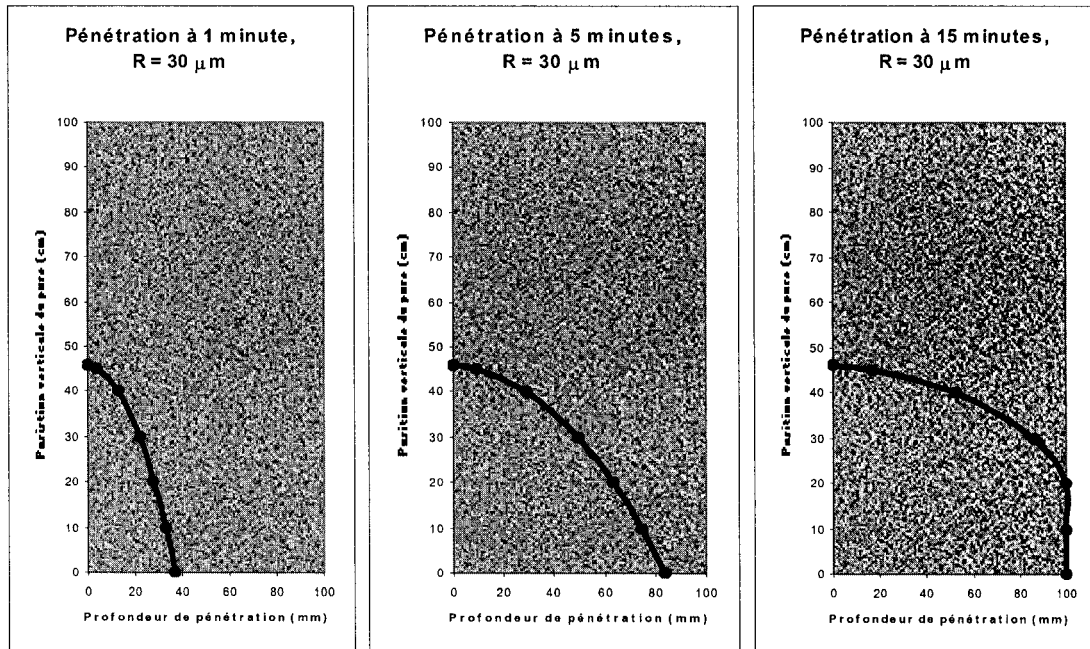


Figure 3.9 : Profils du front de pénétration en fonction du temps dans un tube capillaire

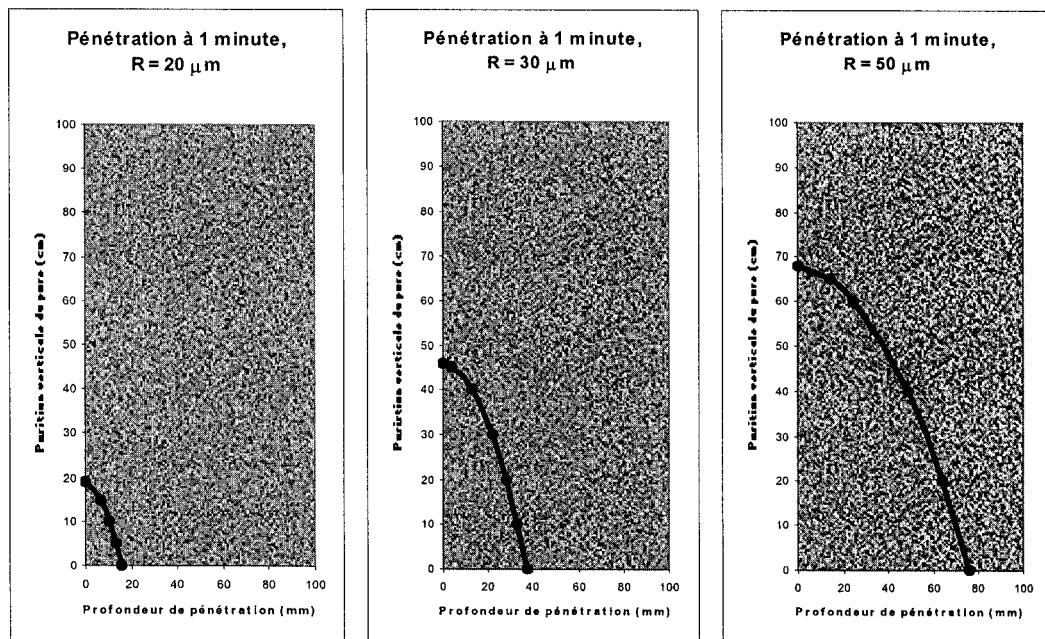


Figure 3.10 : Profils de pénétration en fonction de la taille de pore dans un tube capillaire

L'influence de la pression statique du bain métallique est donc importante et doit être prise en considération lors de l'étude de l'infiltration du métal liquide dans le réfractaire.

3.3. CONCLUSION DE LA SECTION 3

Dans cette section, nous avons considéré les paramètres contrôlant la cinétique d'infiltration d'un liquide non réactif dans un tube capillaire. Ce type d'idéalisation est commun pour représenter l'infiltration d'un réfractaire par un métal liquide, car elle permet de simplifier la modélisation du phénomène et de réduire le nombre de paramètres à gérer. Parmi les paramètres les plus importants, nous avons vu que la mouillabilité du liquide par rapport au solide avec lequel il entre en contact va induire des forces d'interactions à l'interface triple solide – liquide – gaz. Grâce à l'approche thermodynamique, il nous a été possible de définir la tension de surface σ , équivalente à une pression interne positive qui annule les forces de rappel s'exerçant sur la surface du fluide. La tension de surface σ et l'angle de mouillage θ , introduit par la relation d'Young, permettent de caractériser la pression interfaciale à la surface d'un liquide contenu dans un tube capillaire, et ainsi de définir la loi de capillarité.

Une autre propriété du liquide à prendre en compte est sa viscosité dynamique η . Nous avons vu que l'étude de l'écoulement visqueux d'un fluide dans un tube vertical conduit à la relation de Hagen-Poiseuille. Si l'on considère qu'un pore de réfractaire peut être représenté par un tube capillaire, il est possible de faire une analogie entre la relation de Hagen-Poiseuille et la loi de Darcy donnant la résistance à l'écoulement au travers d'un milieu poreux (concept de perméabilité). Des mesures de perméabilité ont montré que, dans certains cas, il est nécessaire de considérer les effets d'inertie dus au transport du fluide. Par ailleurs, le fait de substituer le terme de chute de pression dans la relation de Hagen-Poiseuille par la pression capillaire nous conduit à une expression

combinant la contribution de la capillarité et celle de la viscosité. Il est possible d'adjoindre à cette expression la contribution du poids de métal liquide infiltré et la contribution de la pression métallostatique exercée par le bain métallique, pour finalement parvenir à une loi générale de pénétration d'un pore assimilé à un tube capillaire, par un liquide.

Cette loi générale ne représente cependant que de manière très simplifiée l'infiltration réelle d'un réfractaire par un métal liquide. Comme on l'a dit précédemment, les réactions chimiques qui accompagnent l'infiltration vont modifier une structure poreuse déjà complexe. Il est donc difficile de supposer constant le rayon des pores, même en admettant que la porosité peut être représentée par un ensemble de tubes capillaires. Il est nécessaire dès lors de caractériser la structure poreuse pour mieux cerner le problème. De plus, les espèces chimiques issues des réactions, ainsi que les effets thermiques, ont tendance à modifier les caractéristiques du liquide, telles que la mouillabilité, la viscosité et la densité. Une meilleure connaissance des fluides infiltrants s'impose donc de la même manière...

4. CARACTÉRISATION DES SYSTÈMES EN PRÉSENCE

Les principaux systèmes en présence lors du phénomène d'infiltration sont, d'une part, le système poreux dans lequel l'infiltration va se produire, en l'occurrence le matériau réfractaire, et d'autre part, le liquide infiltrant, qui peut être du métal fondu. D'une certaine façon, comme nous allons le voir, l'atmosphère peut constituer un tiers système.

L'objectif de la caractérisation des systèmes est de déterminer les paramètres régissant la cinétique d'infiltration, et ainsi d'ouvrir une nouvelle voie à un développement du modèle de cinétique d'infiltration.

4.1. LES MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES

Dans le cadre de cette étude, trois bétons réfractaires alumino-silicatés, de différentes teneurs en alumine, ont été choisis. Ils ont été nommés *A*, *B* et *C* et contiennent une quantité croissante d'alumine (*A* étant le réfractaire le plus pauvre en alumine, donc le plus siliceux).

4.1.1. Composition chimique

Le tableau 4.1 présente la composition chimique des réfractaires, selon le manufacturier.

Réfractaire	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	BaO
<i>A</i>	50.2	44.6	1	4.2	0
<i>B</i>	20.9	74	1	4.1	0
<i>C</i>	0.3	90	0.1	3.4	5.9

Tableau 4.1 : Composition chimique des matériaux réfractaires, donnée par le manufacturier (pourcentage en poids)

Une analyse chimique par fluorescence à rayons X (*XRF*, en anglais), nous donne plus de détails sur les composants chimiques contenus dans ces matériaux, comme on peut le voir sur la tableau 4.2 (les composants à l'état de trace ont cependant été omis dans ce tableau)..

	Matériau A		Matériau B		Matériau C	
	Matrice	Agrégats	Matrice	Agrégats	Matrice	Agrégats
SiO ₂	41.80	52.10	23.40	8.92	0.76	0.13
Al ₂ O ₃	44.20	42.20	65.20	87.30	66.50	99.00
Fe ₂ O ₃	0.94	1.56	0.00	1.68	0.18	0.00
MgO	0.31	0.30	0.24	0.22	0.18	0.21
CaO	9.62	1.01	10.40	0.26	9.01	0.23
Na ₂ O	0.20	0.00	0.22	0.00	0.46	0.35
K ₂ O	0.54	0.75	0.16	0.02	0.00	0.00
TiO ₂	0.75	1.57	0.52	2.50	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.22	0.08	0.17	0.05	0.23	0.00
BaO	0.00	0.00	0.00	0.00	13.00	0.37

Tableau 4.2 : Composition chimique des matériaux réfractaires, issue de l'analyse XRF (pourcentage en poids)

Les composants principaux de ces bétons réfractaires sont donc les composants alumino-silicatés, qui apparaissent soit sous forme « pure » (corindon, cristobalite, quartz ou silice amorphe), soit sous forme combinée (mullite, anorthite, andalousite). Le tableau 4.3 donne ainsi une idée des phases alumino-silicatées existantes dans ces matériaux, grâce aux résultats de l'analyse de diffraction par rayons X (*XRD*, en anglais).

Ces composants alumino-silicatés sont introduits dans le mélange sous forme de grains de tailles diverses. Il est de coutume de distinguer les grains les plus gros (appelés agrégats) des grains plus fins (réunis sous le terme générique de matrice). La composition chimique peut varier assez fortement, selon que les grains considérés

fassent partie des agrégats ou de la matrice. La matrice des matériaux *B* et *C* semble être par exemple plus siliceuse que les agrégats, alors que c'est l'inverse pour le matériau *A*.

Matériau A	Matériau B	Matériau C
Cristobalite (SiO ₂)	Corindon (Al ₂ O ₃)	Corindon (Al ₂ O ₃)
Mullite (Al ₆ Si ₂ O ₁₃)	Mullite (Al ₆ Si ₂ O ₁₃)	Barite (BaSO ₄)
Quartz (SiO ₂)	Anorthite, sodian, desordered (Ca,Na)(Si,Al) ₄ O ₈	Beta-Diaoyudaoite (NaAl ₁₁ O ₁₇)
Anorthite, sodian, desordered (Ca,Na)(Si,Al) ₄ O ₈		
	Moissanite-3C (SiC)	
Andalousite (Al2(SiO ₄)O)		
Corindon (Al ₂ O ₃)		

Tableau 4.3 : Répartition des phases cristallines dans les matériaux réfractaires, issue de l'analyse XRD (en gris foncé, phases majeures ; en gris clair, phases moyennes ; en blanc, phases mineures)

De plus, on ajoute en général certaines substances à la matrice, telle que le liant. Le liant permet au matériau non façonné de développer des propriétés mécaniques dès les basses températures, avant ou après séchage. Pour les matériaux réfractaires, le liant est la plupart du temps un ciment alumineux (dans le tableau 4.2, la présence du ciment est révélée par la teneur en chaux CaO). Par adjonction d'eau, les molécules de ciment vont s'hydrater et créer des liaisons hydrauliques.

De plus en plus souvent, on préfère élaborer des bétons à basse teneur en ciment ou à ultrabasse teneur en ciment. En effet, l'examen du diagramme d'équilibre Al₂O₃ – CaO – SiO₂ fait nettement apparaître que la présence de CaO dans ce système fait augmenter de façon très sensible la quantité de phase liquide, et va entraîner une chute des propriétés mécaniques à chaud. Par ailleurs, la mise en place d'un béton classique avec 15 à 25 % de ciment, sans adjuvant particulier, nécessite entre 8 et 15 % d'eau, suivant la nature de son agrégat. L'eau liée sera comprise entre 4 et 8 % suivant la teneur en ciment et le reste constituera l'eau d'humidité qui sera évacuée par séchage.

On aura donc, après étuvage, une porosité raisonnable (environ 15 %), mais, en réalité, après déshydratation complète (après 600°C), on obtient une porosité de l'ordre de 25 %. Ces deux facteurs (forte teneur en de chaux et forte porosité) condamnent les bétons classiques à être des produits de qualité inférieure par rapport aux briques équivalentes. Il est donc nécessaire de réduire la teneur en ciment et la porosité.

Ceci a pu être réalisé, il y a une trentaine d'années, par l'application de la défloculation en milieu basique. L'argile fut le premier moyen utilisé pour la défloculation, afin de mieux disperser le ciment, de moins en mettre et de diminuer la quantité d'eau (et donc réduire la porosité finale). Les résultats ont immédiatement été surprenants avec de fortes densités (moins de 20 % de porosité après déshydratation du ciment), et surtout une grande stabilité des propriétés en fonction de la température, en raison de la création d'une liaison complexe associant un effet de gel à une réaction de type pouzzolanique. Malheureusement, la porosimétrie du système était très fine (environ 0,1 μm , alors que précédemment, elle était de quelques micromètres), et l'évacuation de l'eau au séchage se faisait très difficilement. C'est pourquoi le développement de ce bétons a été fortement limité jusqu'en 1975/1977.

Les travaux entrepris pour résoudre ce problème ont permis de rendre ces bétons moins sensibles au séchage, grâce à la modification de la granulométrie, au remplacement de l'argile par de la fumée de silice ou d'autres poudres ultrafines, mais aussi par l'utilisation de fibres organiques créant des capillaires dans le béton ou développant une réaction chimique qui permet, au moment de la prise, d'ouvrir la porosité (introduction d'aluminium). Tout en ayant gagné en densité et diminué la teneur en chaux, ces matériaux conservent une thermo-plasticité supérieure à celle des briques équivalentes, mais parfois une résistance à la corrosion inférieure.

On peut préciser que le rôle des défloculant est de modifier artificiellement la viscosité d'une suspension donnée ou d'en réduire la quantité d'eau à viscosité

identique. Ils sont également utilisés pour disperser les particules ultrafines qui, à cause des forces de cohésion, se trouvent sous forme d'agglomérats, les empêchant de jouer complètement leur rôle. Les défloculants les plus connus et utilisés sont :

- le silicate de soude
- l'hexamétaphosphate de soude (NaPO_3)₆
- le tripolyphosphate de soude ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$)
- le lignosulfonate et sels de Mg, Na ou NH_3

Des traces de phosphate et d'oxyde de sodium sont effectivement présentes dans la compositions chimiques des matériaux *A*, *B*, et *C* (en particulier dans la matrice).

D'autres adjuvants sont parfois joints à la composition des bétons réfractaires, tels que les oxydes de sodium, de potassium et de titane, qui vont augmenter le degré de cristallisation du béton et faciliter la mullitisation ⁽¹⁰⁾.

4.1.2. Distribution granulométrique

La distribution granulométrique est une caractéristique importante d'un béton réfractaire, car une bonne distribution granulométrique lors de la fabrication du béton vise à produire un mélange de grains de compacité maximale. Ainsi, il est possible de réduire la porosité du béton en utilisant une distribution en taille continue des grains. Une grande différence en taille des grains peut améliorer l'empilement des grains, les fines particules comblant les vides interstitiels entre les gros grains. En fait, la distribution granulométrique est optimisée pour une composition intermédiaire, dans laquelle les fines particules comblent tous les vides existants entre les gros grains, mais sans dilater la structure.

Cette optimisation de la distribution granulométrique peut être obtenue par formulation mathématique. D'après Andreasen ⁽¹⁰⁾, la répartition correspondant à la densité la plus grande est donnée par :

$$CPFT = 100 \times \left(\frac{D}{D_L} \right)^n \quad (4.1)$$

où *CPFT* (Cumulative Percentage Finer Than...) est le pourcentage cumulatif de particules de diamètre inférieur à *D*,

D_L est le diamètre des grains les plus gros,

et *n* est le nombre caractéristique de la distribution (habituellement compris entre 0,3 et 0,5).

Furnas, tenant compte du fait que la compacité maximale est limitée par les grains les plus petits, propose une formule modifiée d'Andreasen :

$$CPFT = 100 \times \frac{D^n - D_s^n}{D_L^n - D_s^n} \quad (4.2)$$

où *D_s* est le diamètre des grains les plus petits.

La distribution classe par classe en taille des grains des bétons utilisés a été obtenue par tamisage (voir figure 4.3). On constate que la distribution pour le béton *A* est relativement similaire à celle du béton *B*. En revanche, la distribution du béton *C* montre une plus forte proportion de gros grains et de fines particules, au détriment des grains de taille intermédiaire.

La figure 4.4 représente la distribution cumulative en taille des grains des bétons utilisés. La tracé optimal de la distribution selon la formule modifiée d'Andreasen y a été adjoint, en prenant pour tailles maximale et minimale des grains l'ouverture de tamis respectivement maximale et minimale. Le nombre caractéristique *n* a été pris égal à 0,3, qui est une valeur couramment usitée dans le domaines des réfractaires.

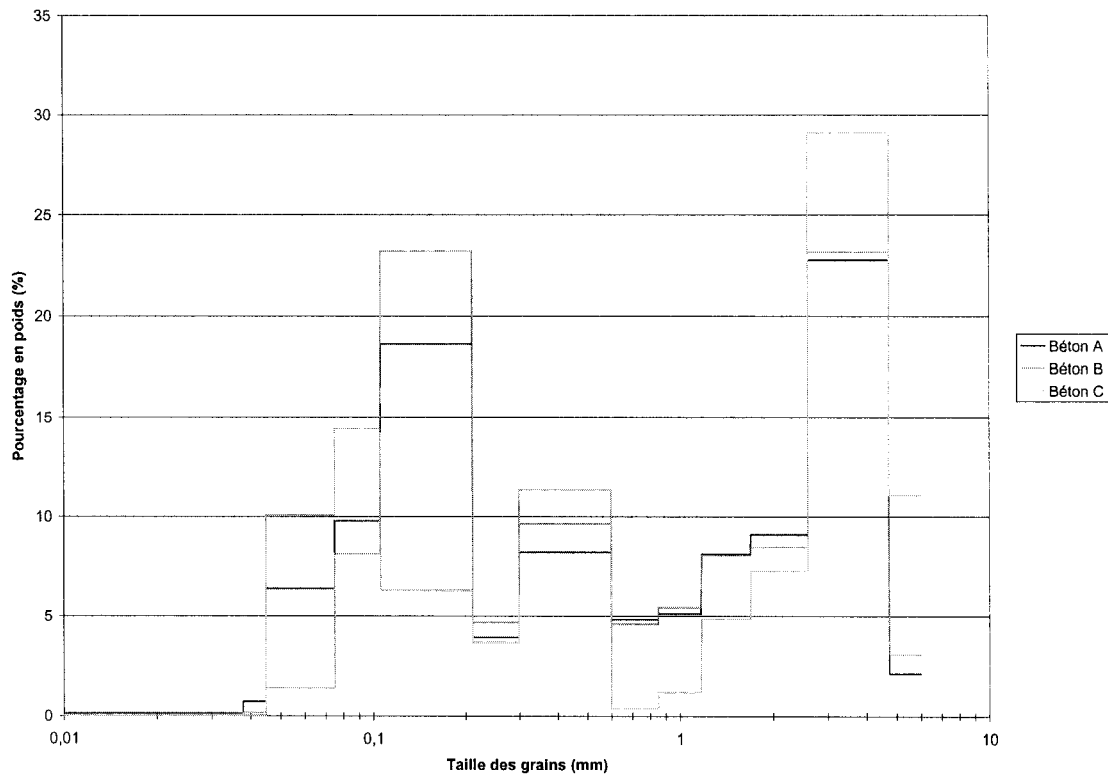


Figure 4.1 : Distribution classe par classe en taille des grains des bétons A, B et C

La distribution cumulative en taille des grains montre, là encore, une teneur inférieure en grains intermédiaire et une teneur supérieure en fines dans le cas du béton C par rapport aux bétons A et B. De plus, le matériau C semble montrer une certaine distorsion par rapport à la courbe d'Andreasen : il existe une surestimation des particules de la matrice et une sous-estimation des agrégats.

On doit noter que la distinction entre la matrice et les agrégats est arbitraire, la limite de séparation étant fixée à 300 μm . Du point de vue granulométrique, il n'est pas très évident de percevoir cette distinction, car la distribution est relativement continue. Cependant, cette distinction est nécessaire à cause de la composition chimique (seule la matrice contient les adjuvants, en particulier les particules de ciment alumineux), mais

aussi à cause du comportement à la cuisson (on considère que la matrice est la partie du réfractaire qui sera la plus susceptible de fritter).

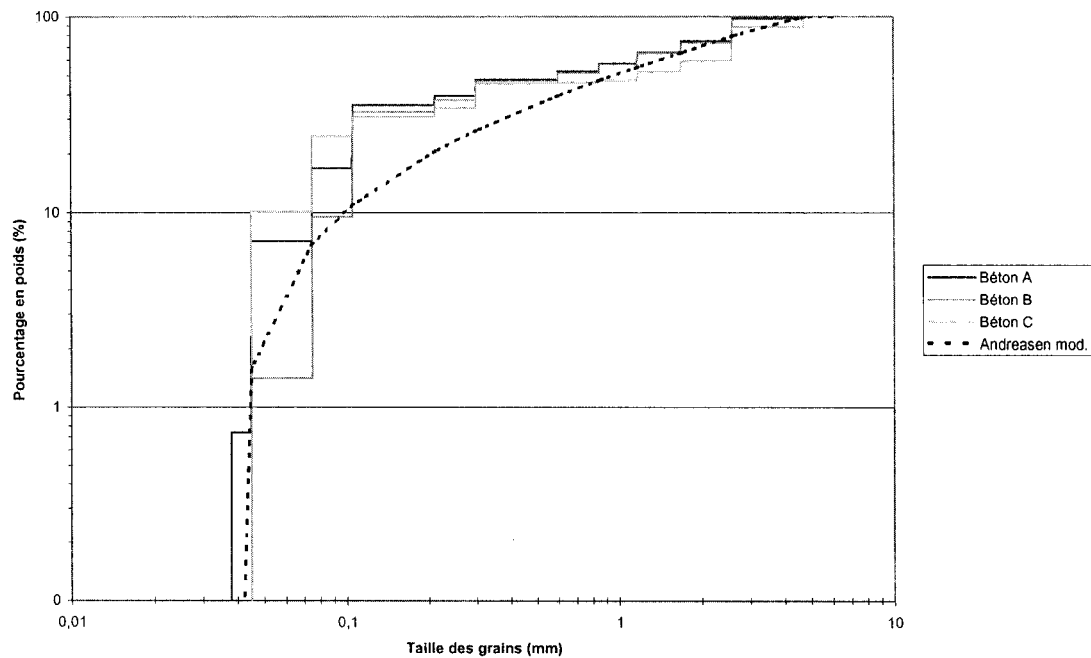


Figure 4.2 : Distribution cumulative en taille des grains des bétons *A*, *B* et *C*

4.1.3. Courbes de frittage

On s'est servi des mesures dilatométriques pour étudier l'évolution de la dilatation thermique des matériaux *A*, *B* et *C* lors de leur cuisson jusqu'à 1000°C. La montée en température était de 3°C par minute. Les courbes issues de ces essais sont présentées sur la figure 4.3.

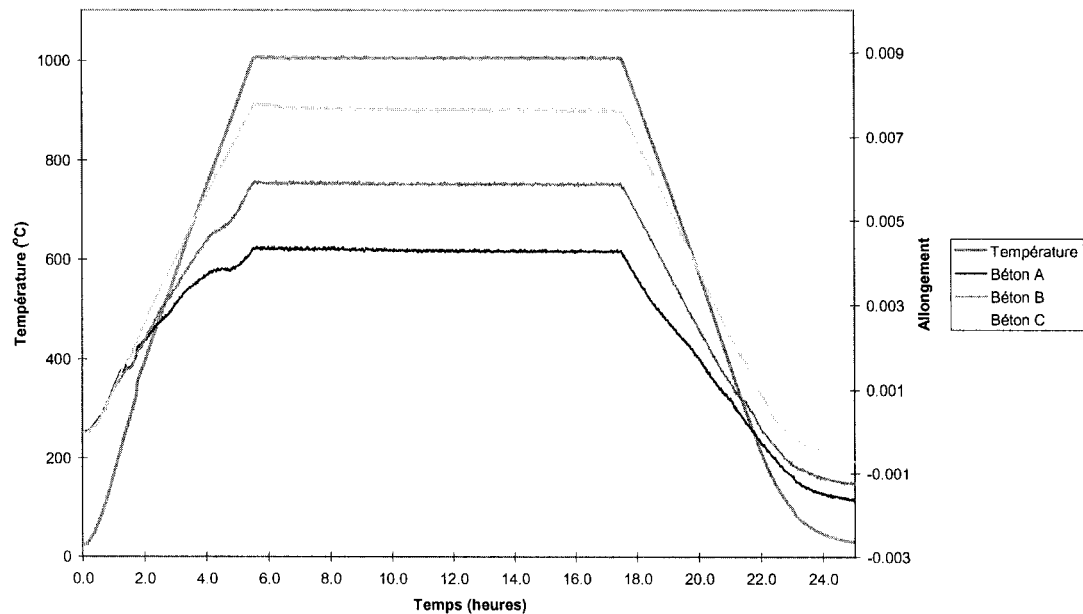


Figure 4.3 : Courbes de frittage des matériaux *A*, *B* et *C*

Ces courbes présentent une légère déviation lors de la dilatation thermique quasi-linéaire après 200°C, ce qui doit correspondre à la déshydratation des bétons. Comme on l'a vu, la déshydratation des bétons passe d'abord par l'évaporation de l'eau libre au-dessus de 100°C (cette étape est en général effectuée dans une étuve pendant 24 heures), puis par un long et complexe processus de transformation de la formulation des molécules de ciment alumineux. Au-delà de 600°C, on peut considérer qu'un béton est complètement déshydraté.

Une autre variation, plus importante, apparaît vers 800°C. Le fait que cette variation est quasiment inexistante pour le matériau *C* très alumineux, et qu'elle se fait plus importante avec une teneur plus élevée en silice, laisse croire qu'il s'agit d'un frittage de la fumée de silice. On a vu que la fumée de silice (ou microsilice) joue le rôle de particules ultrafines dans la granulométrie des bétons. C'est un produit bon marché, contribuant à la liaison hydraulique (effet pouzzolanique). La fumée de silice conduit

toutefois à un frittage précoce, dès 800°C. Son principal inconvénient est de limiter la réfractarité pour des teneurs en chaux de plus de 0,8 %.

Il s'ensuit une plus grande densification des matériaux *A* et *B* par rapport au matériau *C*. Cependant la densification finale reste relativement faible (moins de 0,2 %).

4.1.4. Porosité et densité

Les mesures de porosité et de densité ont été effectuées selon la méthode d'Archimède, d'après le standard ASTM C-830. Les échantillons ont été pesés à sec, suspendus en immersion dans l'eau et saturés en eau. Les résultats pour la porosité sont rassemblés sur la figure 4.4, et ceux pour la densité sont représentés sur la figure 4.5.

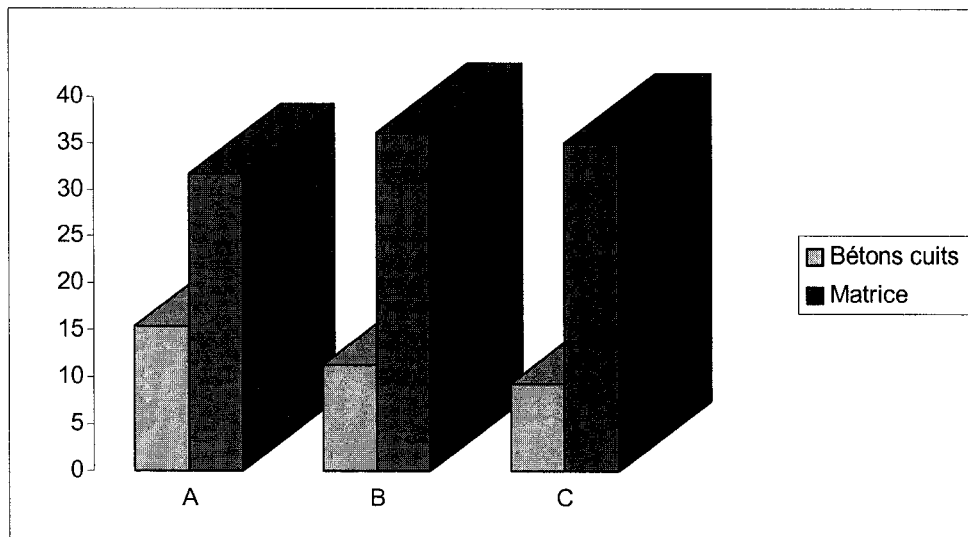


Figure 4.4 : Porosité ouverte en pourcentage des matériaux *A*, *B* et *C*

On voit que la porosité ouverte est décroissante pour *A*, *B* et *C*, *C* étant le béton le moins poreux. L'explication de cette tendance tient probablement à la teneur en chaux, qui va moduler la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage du béton. La porosité a été aussi mesurée pour la seule matrice (constituée des grains de moins de 300 µm de diamètre) cuite à 900 °C, tout comme les bétons. On constate que la porosité est bien

plus importante (jusqu'à 3 fois plus) que pour les bétons. On pourrait expliquer ceci par la teneur plus élevée de chaux (qui est principalement contenue dans la matrice des bétons). Mais le fait que la porosité soit légèrement croissante pour les matrices *A*, *B* et *C*, respectivement, indique que la distribution granulométrique doit avoir un rôle plus important.

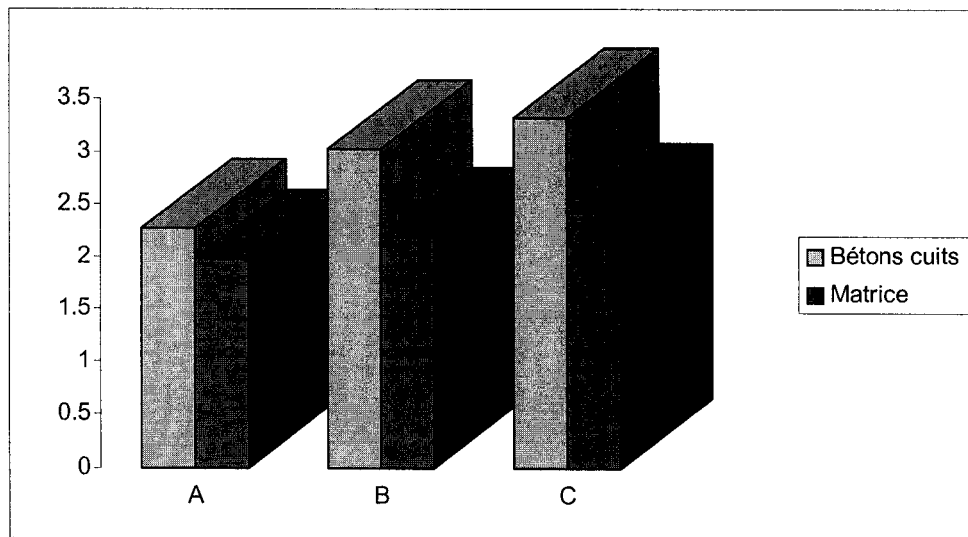


Figure 4.5 : Densité apparente en g/cm³ des matériaux *A*, *B* et *C*

La densité apparente, qui englobe la matière et la porosité fermée, est croissante pour *A*, *B* et *C*, respectivement, aussi bien pour les bétons que pour la matrice. Cette variation tient probablement à la grande différence dans les compositions chimiques (l'alumine étant plus dense que la silice).

4.1.5. Distribution porosimétrique

Van Brakel ⁽⁴¹⁾, dans son excellente revue de la porosimétrie au mercure, mentionne que Washburn suggéra dès 1921 qu'il devait être possible d'obtenir une distribution en taille de pore à partir des données pression – volume de la pénétration du mercure dans un corps poreux. Le premier article entièrement dédié à la porosimétrie au

mercure, décrivant l'élaboration et la manipulation de l'équipement et présentant un grand nombre de données expérimentales, a été publié par Ritter et Drake en 1945.

Le principe de la porosimétrie au mercure est basée sur le fait que le mercure se comporte comme un liquide non-mouillant par rapport à la plupart des substances. Ainsi, il ne pénétrera pas de manière spontanée à travers les ouvertures et les fissures de ces substances et on doit appliquer une pression pour le faire pénétrer. Si un échantillon de solide poreux est scellé dans un récipient connecté à un tube capillaire, si cet échantillon est mis sous vide, puis rempli par du mercure et soumis à une pression croissante, le mercure pénètre dans les pores, et son niveau dans le tube capillaire diminue. Si la diminution du niveau est enregistrée en fonction de la pression, une courbe porosimétrique est obtenue, indiquant le volume de mercure ayant pénétré dans les pores de l'échantillon à une pression donnée.

La pression appliquée au mercure, P , compense la différence de pression s'exerçant sur le ménisque de mercure dans le corps poreux, donnée par l'équation de Laplace (3.10).

$$P_{app} = P_{gaz} - P_{liquide} = 2\sigma H \quad (4.3)$$

où σ est la tension de surface du mercure et H est la courbure du ménisque. Dans le cas du mercure, une tension de surface de 485 mN/m est habituellement utilisée. Cependant, pour du mercure pur, différentes valeurs ont été mesurées dans une fourchette de 410 à 515 mN/m. La courbure H dépend de l'angle de mouillage et de la géométrie du pore. Ainsi, pour des capillaires cylindriques, on a :

$$H = \frac{\cos \theta}{R} \quad (4.4)$$

où θ est l'angle de mouillage et R est le rayon du pore.

Pour un ménisque compris entre deux surfaces planes, on a par contre :

$$H = \frac{\cos \theta}{2d} \quad (4.5)$$

où d est la distance entre les deux surfaces.

En combinant les équations (4.3) et (4.4), on retrouve l'expression (3.17), issue de la relation de Young.

$$P_{app} = \Delta P = \frac{2\sigma_{lg} \cos \theta}{R} \quad (4.6)$$

L'équation (4.6) est souvent appelée équation de Washburn. Même si, dans la plupart des corps poreux, il n'existe pas de pores cylindriques, cette équation est malgré tout utilisée de manière quasi-systématique pour calculer la distribution en taille de pore à partir des données de porosimétrie au mercure. En effet, on considère que l'on obtient des rayons de pore équivalents ou effectifs.

Les valeurs couramment relevées pour l'angle de mouillage du mercure oscillent entre 130° et 140° . Certaines valeurs ont cependant été trouvées être supérieures. En fait le problème est que la surface solide durant la pénétration du mercure dans le corps poreux est plus rugueuse que lors des essais de mesure de l'angle de mouillage. Comme la rugosité de la surface solide a tendance à augmenter l'angle de mouillage effectif, et aussi parce que la géométrie des pores n'est parfaitement cylindrique, on choisit parfois pour la porosimétrie au mercure un angle de mouillage de 180° .

Dans nos essais, on a pris un angle de mouillage de 140° et une tension superficielle de 485 mN/m (ou dynes/cm). Les pressions mesurées ont été automatiquement converties en diamètre équivalent de pores par le programme gérant le porosimètre. Le pourcentage de volume total d'intrusion du mercure, pour chaque pression mesurée, a été converti en probabilité pour le diamètre de pore d'exister dans la structure poreuse.

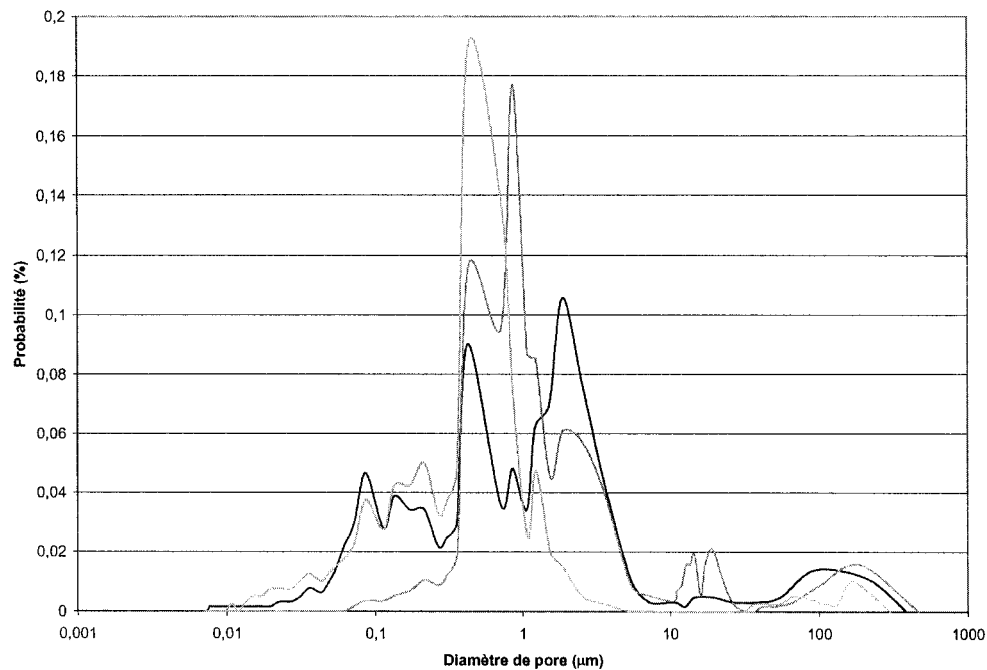


Figure 4.6 : Courbes porosimétriques des matériaux *A*, *B* et *C*

Par ailleurs, le programme a permis de calculer certaines données statistiques, figurant dans le tableau 4.4, telles que le diamètre moyen des pores et la surface totale poreuse. On constate que le béton *B* est le béton possédant statistiquement les plus gros pores, selon les données porosimétriques. La présence de fibres organiques dans la composition du béton *B* explique peut-être ce fait.

Béton	Diamètre moyen des pores (μm)	Surface totale poreuse (m ² /g)
A	0.20	1.31
B	0.94	0.25
C	0.16	0.99

Tableau 4.4 : Données statistiques porosimétriques

Il est nécessaire de noter que certaines limites de la technique de porosimétrie au mercure doivent rendre prudent dans l'interprétation des résultats. Ainsi, les résultats obtenus peuvent être limités de trois façons :

- Le volume de porosité rempli par le mercure est limité par la pression maximale.
- À l'autre bout de l'échelle, la pénétration des très grands pores est limitée par la taille de l'échantillon, qui détermine une pression minimale. Les très grands pores peuvent donc ne pas être révélés.
- La taille de l'échantillon est finie et la plupart du temps assez petite. La condition de bordure déterminera un résultat qui ne sera pas forcément représentatif d'un espace poreux infini, puisque les ouvertures sur les grands pores sont plus facilement accessibles pour de plus petits échantillons.

Il peut aussi y avoir des facteurs qui diminuent la précision ou la fiabilité des résultats d'une manière plus directe :

- Même si l'on démarre le test avec du mercure pur, la surface du mercure peut être contaminée par des substances adsorbées sur la surface de l'échantillon. On sait que les impuretés peuvent faire varier la tension de surface jusqu'à 30%. Cependant, il semble que cela ne cause pas de sérieux problèmes dans le cas de la porosimétrie au mercure.
- Avant que le mercure entre dans le pénétromètre, ce dernier est dégazé. La mise sous vide de l'échantillon peut changer l'angle de mouillage de l'échantillon (en comparaison avec l'angle de mouillage sous conditions atmosphériques, par exemple). Il a été établi qu'un fort dégazage est nécessaire si les pores les plus petits doivent être aussi pris en compte. Cependant, l'erreur causée par la compression de l'air résiduel semble devenir significative seulement pour des pressions de dégazage de plus de 10 Torr.

- Des corrections doivent être faites pour prendre en compte la compressibilité du pénétromètre et du mercure. Ces effets peuvent être facilement éliminés en réalisant un essai à blanc.
- Un sérieux problème apparaît lorsque l'échantillon est mécaniquement détruit par la pression exercée par le mercure. Sur la base des données disponibles, on peut estimer que les échantillons ont été détruits seulement si la porosité est très grande ou s'il y a un nombre significatif de pores fermés.
- Suite à la compression du mercure, la température dans le pénétromètre peut augmenter considérablement. On a estimé que cette augmentation pouvait être de l'ordre de 15°C. Ce changement dans la température va provoquer une modification du volume du mercure et du volume du pénétromètre.

À cela, on doit ajouter les problèmes d'interprétation dus au phénomène d'hystérésis. En effet, lorsque la pression est réduite après la pénétration du mercure, la relation pression – volume peut être différente dans le cas du retrait du mercure (phase d'extrusion) par rapport au cas de la pénétration (phase d'intrusion). En fait, deux causes sont imputables au phénomène d'hystérésis :

- Hystérésis dû à l'angle de mouillage. Si l'angle d'avancée (voir la section 3.1.2) est différent de l'angle de retrait, la courbe de retrait sera différente de la courbe de pénétration.
- Hystérésis dû à la structure poreuse. Dans ce cas, selon Kloubek ⁽²³⁾, une plus petite fraction du volume poreux est rempli durant l'intrusion que durant l'extrusion à la même pression. Lorsque la pression est totalement abaissée (jusqu'à la pression atmosphérique), des quantités diverses de mercure demeurent coincés de manière irréversible dans les échantillons, selon la structure poreuse de l'échantillon. Ces quantités peuvent varier d'une fraction négligeable à la presque totalité du volume poreux et se situent en général à hauteur de 80-85 %.

4.1.6. Micrographies de la porosité

Des observations au microscope optique ont été effectuées afin de mieux cerner les formes que peut revêtir la structure poreuse des bétons. Deux d'entre elles sont présentées à la figure 4.7 et à la figure 4.8.

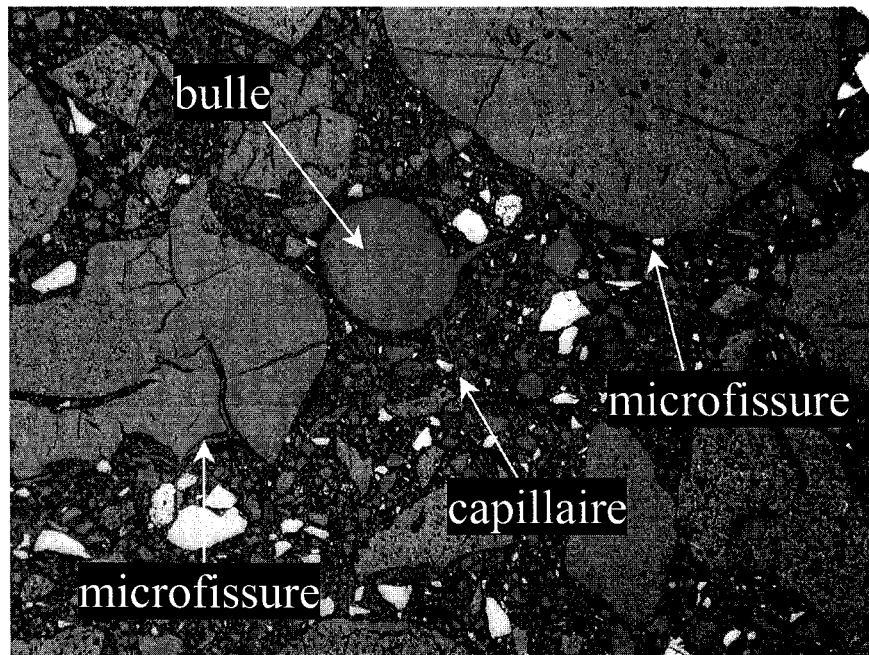


Figure 4.7 : Micrographie du béton *B* (x 5)

Sur ces figures, on peut distinguer trois types de porosités :

- des bulles d'air qui ont été créées lors du coulage du béton
- des capillaires présents dans la matrice, probablement créés suite au séchage et à la déshydratation des béton
- des microfissures plutôt localisées autour des aggrégats, créées lors de la cuisson du béton, à cause de la différence entre les dilatations thermiques de la matrice et des agrégats

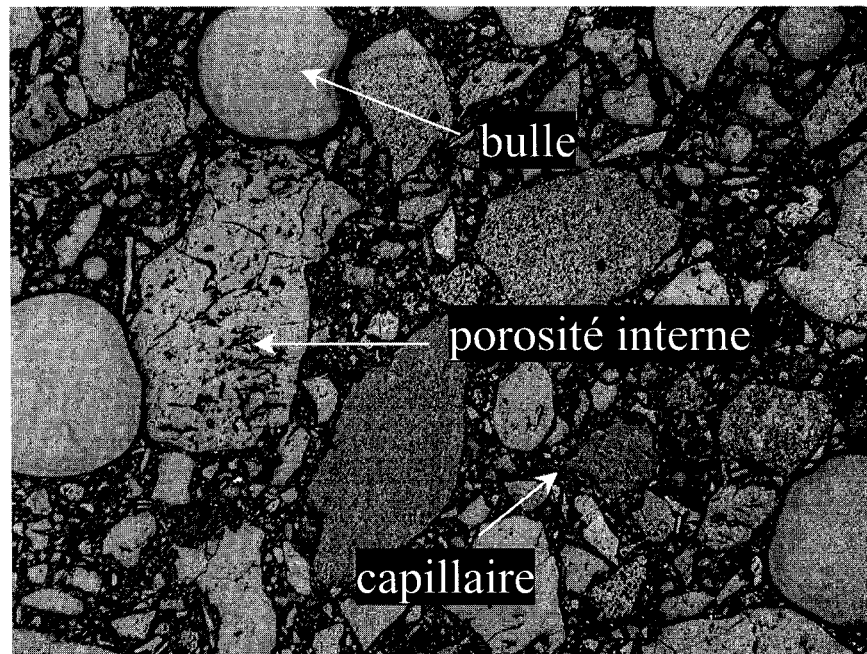


Figure 4.8 : Micrographie du béton C (x 2,5)

Les porosités internes aux agrégats sont la plupart du temps des porosité fermées. Lorsqu'il s'agit de porosité ouverte, elles représente un petit volume par rapport au reste de la structure poreuse ⁽²⁶⁾.

4.2. LES LIQUIDES INFILTRANTS

La caractérisation des liquides infiltrants s'est révélée être moins aisée que la caractérisation des réfractaires. Elle s'est faite pour trois liquides différents : les deux liquides utilisés à température ambiante lors des essais d'infiltrations et l'aluminium pur fondu (dans la mesure du possible). Les deux liquides infiltrants utilisés durant les essais sont :

- une solution aqueuse à 0,5 % de bleu de méthylène
- de l'huile colorée en rouge (utilisée dans les boîtes de transmission automatique des voitures)

Trois propriétés ont été analysées : la densité, la viscosité et la mouillabilité.

4.2.1. La densité et la viscosité

Dans le cas des liquides à température ambiante, la densité a été mesurée à l'aide de pycnomètres. Les pycnomètres de 50 ml ont été remplis, puis pesés. La viscosité a été mesurée à l'aide d'un viscosimètre *Haake* VT 500 à cylindres coaxiaux. Les mesures sont présentées dans le tableau 4.5.

	Densité (kg/m ³)	Viscosité (cp)
Solution aqueuse	999	1,1
Huile	851	83

Tableau 4.5 : Densité et viscosité expérimentales des liquides infiltrants, mesurées à 20°C

Dans le cas de l'aluminium fondu, les mesures de densité et de viscosité n'ont pas été possibles. C'est pourquoi seules des données bibliographiques sont présentées en figures 4.9 et 4.10, d'après Mondolfo ⁽²⁸⁾.

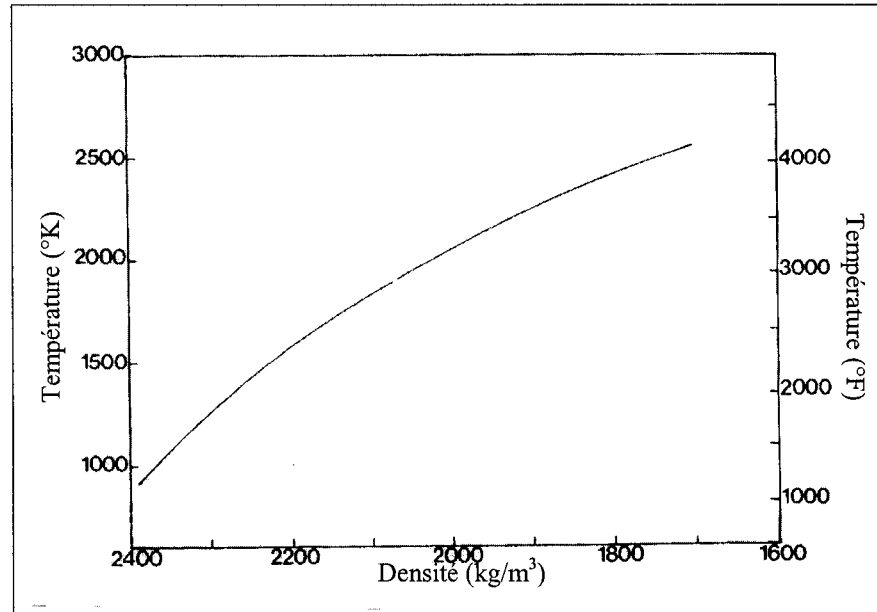


Figure 4.9 : Densité de l'aluminium pur en fonction de la température

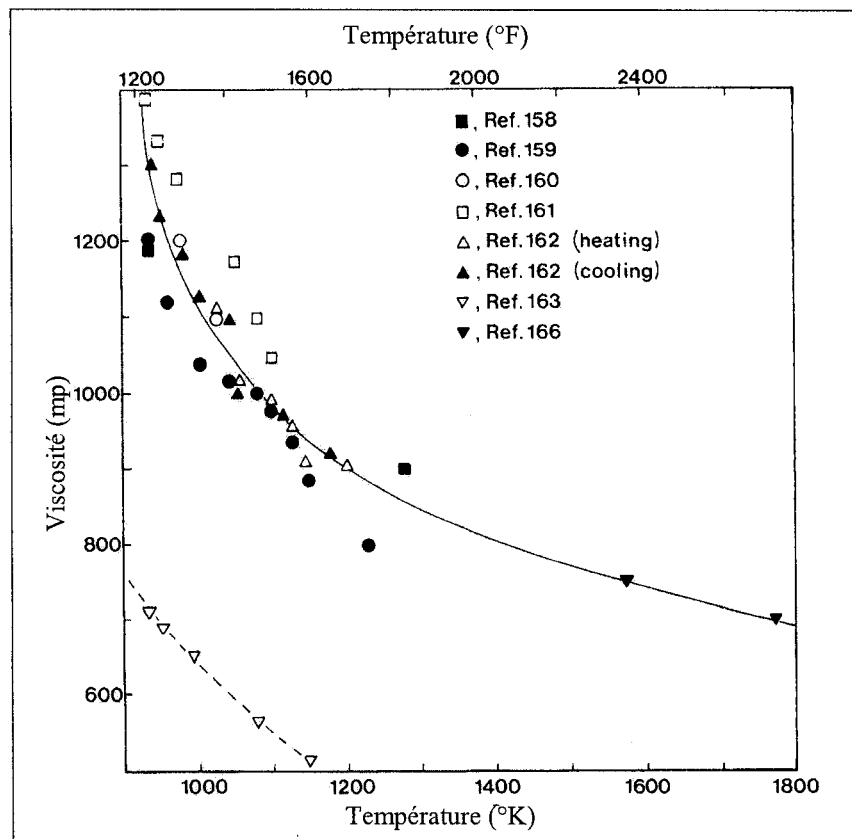


Figure 4.10 : Viscosité de l'aluminium pur en fonction de la température

4.2.2. La mouillabilité

Les mesures expérimentales, citées dans la littérature, afin de caractériser la mouillabilité d'un liquide sont extrêmement diverses par leur nature, mais souvent aussi par leurs valeurs. Elles n'ont dépendent d'aucun standard préétabli.

En général, elles visent à déterminer l'angle de mouillage et la tension de surface. Concernant les liquides à température ambiante, Jacquot ⁽²²⁾ a effectué un travail de caractérisation de grande qualité pour des liquides tels que de l'eau, de l'eau salée, du glycérol, et pour des substrats tels que du verre, du polycarbonate et du Teflon. Cependant, il a préféré se baser sur d'autres paramètres : η , représentant l'étalement, λ , cotangente de l'angle de mouillage, et μ , valeur limite de la courbure moyenne. Le dispositif expérimental qu'il a utilisé est celui de la goutte posée, bien qu'il existe d'autres types de dispositifs. ; grâce à la forme de la goutte, il a pu en tirer les paramètres de mouillage.

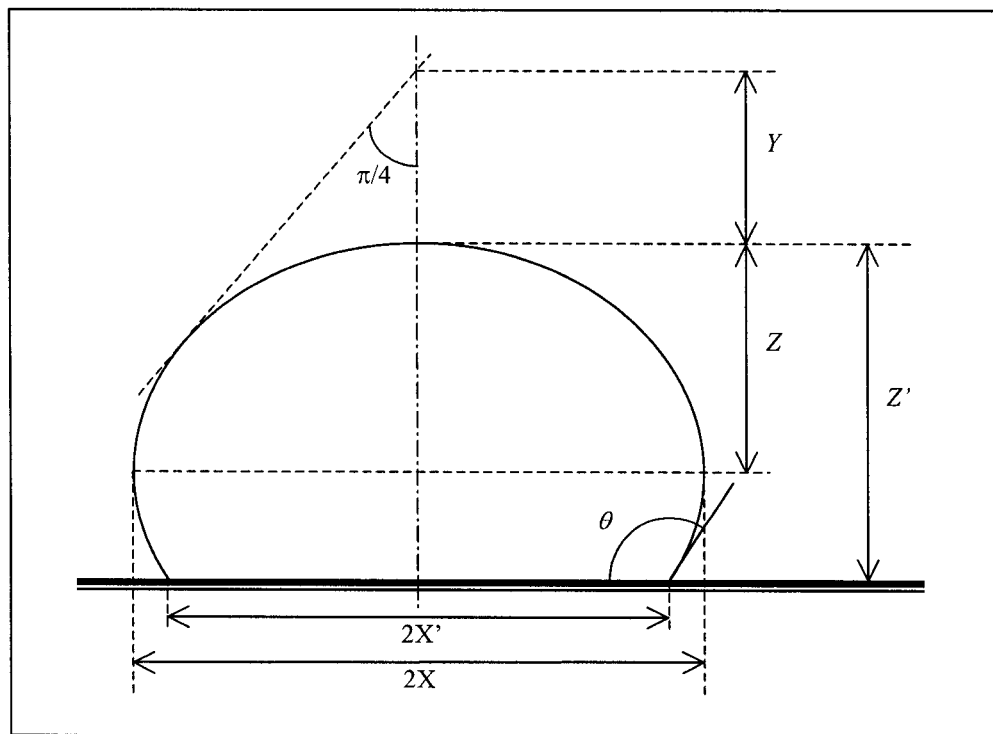


Figure 4.11 : Paramètres géométriques de la goutte posée

Habituellement, la forme de la goutte posée est caractérisée par les paramètres géométriques indiqués sur la figure 4.11. L'angle de mouillage est mesurable directement, alors que la tension superficielle γ est donnée en J/m² par la formule suivante :

$$\gamma = (1/2)\rho g Z^2 1.641X / 1.641X + Z \quad (4.7)$$

où ρ est la densité du liquide en kg/m³,

et g est l'accélération gravitationnelle en m/s².

Ogino ⁽³¹⁾ indique que la méthode de la goutte posée est la technique la plus courante pour caractériser la mouillabilité d'un métal à haute température. Cependant, les résultats sont beaucoup plus sensibles aux facteurs extérieurs. C'est pourquoi les mesures doivent être extrêmement précises. Il faut d'abord que la goutte de métal fondu posée sur le substrat ait une bonne symétrie axiale. En fait, il existe deux techniques pour préparer la goutte de métal :

- La première consiste à placer, à température ambiante, un petit morceau de métal sur la surface plane du substrat, puis d'élever la température. Le morceau de métal va fondre et former une goutte.
- Dans la seconde, on laisse tomber sur la substrat du métal fondu à température désirée pour l'expérience.

Dans la première technique, la forme du morceau de métal solide n'est en général pas satisfaisante et il est difficile d'obtenir une goutte de métal de bonne symétrie axiale. Pour la seconde technique, un dispositif pour faire tomber la goutte de métal fondu doit être aménagé à l'aide d'un piston en alumine soit horizontal, soit vertical. La distance entre l'orifice de sortie du piston et la surface du substrat doit être aussi courte que possible.

Par ailleurs, la relation de Wenzel montre que l'angle de mouillage dépend fortement de la rugosité de la surface du substrat (voir la figure 4.12). Il est donc

nécessaire que la surface soit bien polie. De plus, la symétrie axiale de la goutte est influencée par le degré d'horizontalité de la surface du substrat. Comme la correction de l'horizontalité est très difficile à haute température, il vaut mieux qu'elle soit faite avant la montée en température.

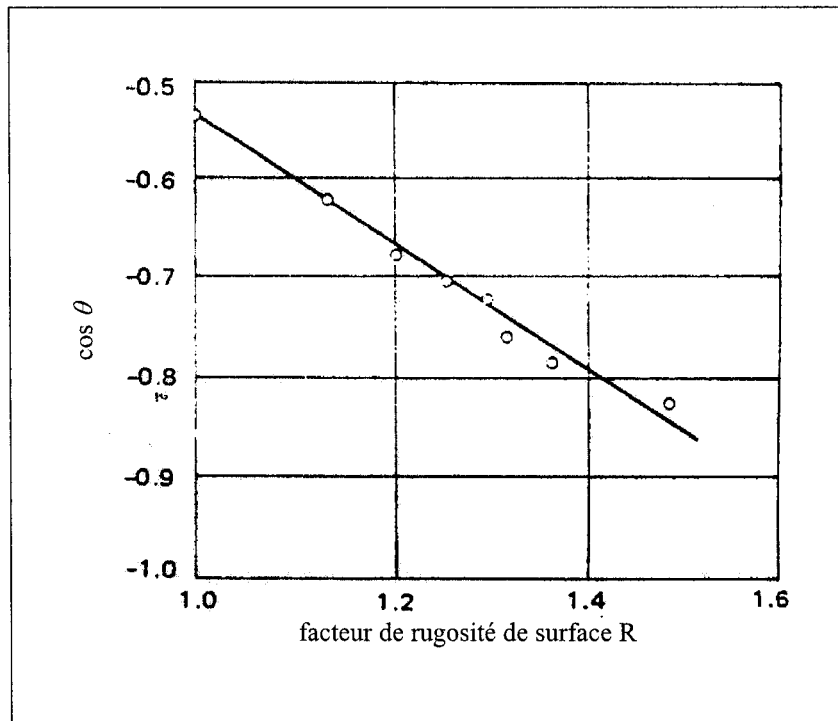


Figure 4.12 : Représentation de la relation de Wenzel dans le cas du système fer fondu – alumine à 1600°C

L'angle de mouillage et la tension superficielle sont aussi fortement influencés par l'atmosphère environnante. Dans le cas d'une atmosphère riche en oxygène, le métal fondu est oxydé et la teneur en oxygène dans le métal augmente jusqu'à atteindre un équilibre avec le potentiel de l'oxygène dans l'atmosphère. L'oxygène ne réagit pas seulement avec le métal fondu, mais aussi avec le réfractaire à l'interface solide – liquide et forme une couche intermédiaire (pour l'aluminium, voir la section 2.1.1).

L'énergie interfaciale diminue suite à la formation de cette couche interfaciale, et l'angle de mouillage, ainsi que la tension de surface, diminuent aussi.

D'un autre côté, si la présence de l'oxygène dans l'atmosphère est extrêmement faible, la teneur en oxygène dans le métal fondu diminue et le métal réagit avec le substrat réfractaire. À l'interface solide – liquide, les oxydes du réfractaire sont réduits ; la frontière entre le solide et le liquide devient irrégulière. L'interaction entre le réfractaire et le métal fondu augmente et l'angle de mouillage diminue. Ainsi, la teneur en oxygène dans l'atmosphère est un facteur très important dans la caractérisation de la mouillabilité d'un métal fondu.

Des expériences ont été menées, afin de déterminer les propriétés de mouillage de l'aluminium. Le dispositif, basé sur le principe de la goutte posée, est représenté sur la figure 4.13.

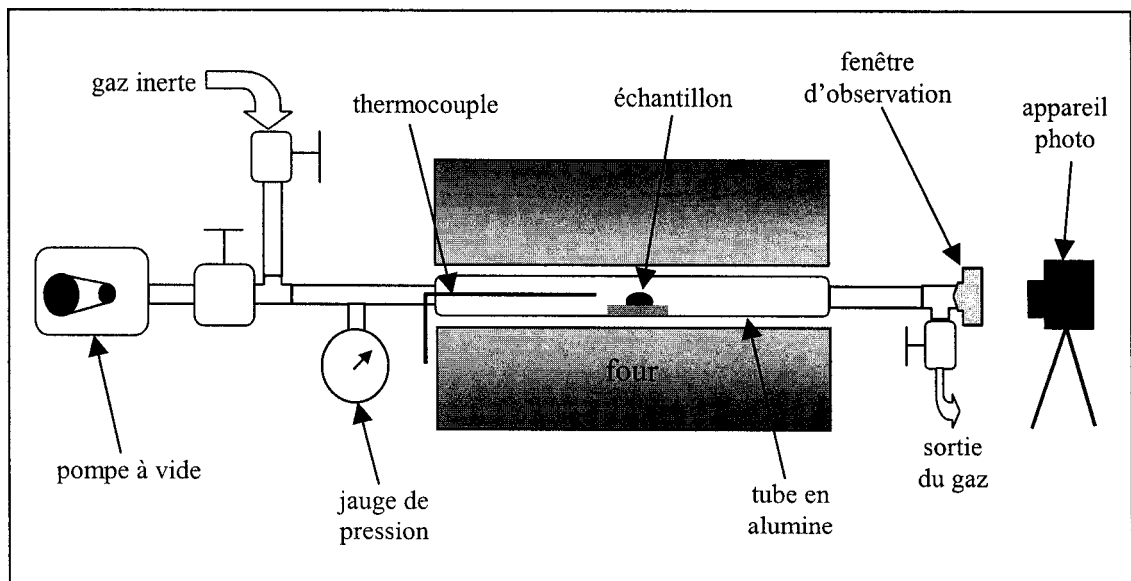


Figure 4.13 : Schéma du dispositif expérimental de la « goutte posée »

Les photographies qui ont été prises sont de bonne qualité (voir la figure 4.14). Cependant il est difficile de placer l'appareil photo de façon à éviter le phénomène de parallaxe (si l'objectif n'est pas exactement au même niveau que la surface du substrat, les mesures risquent d'être faussées).

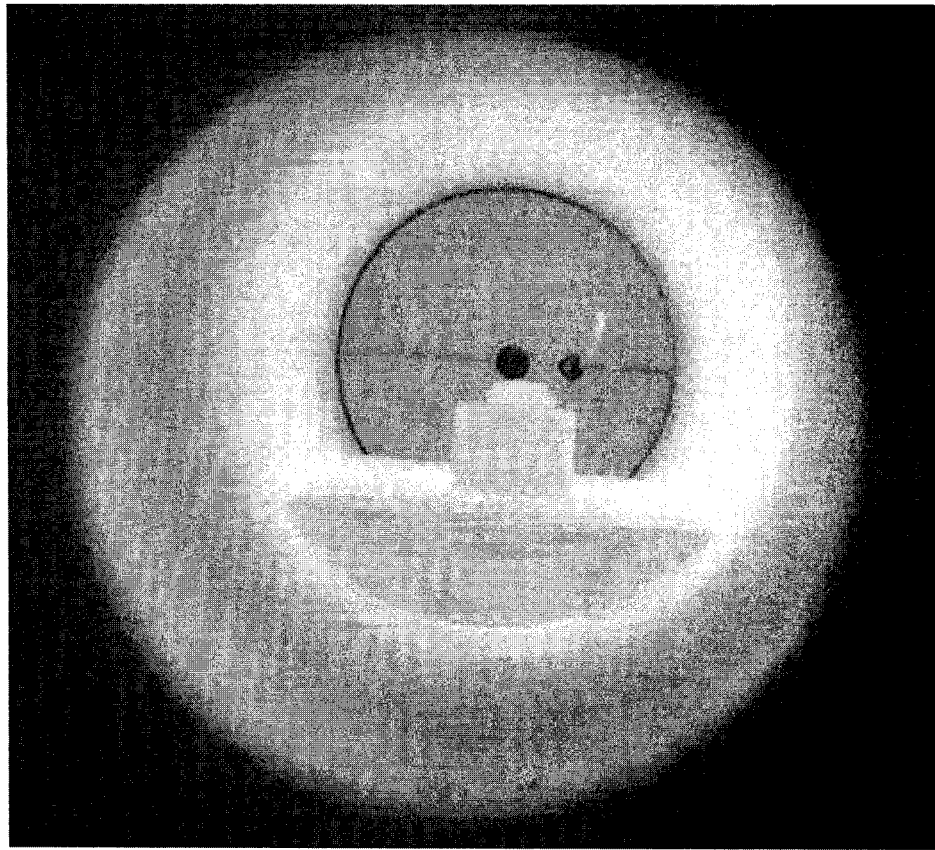


Figure 4.14 : Photographie d'une goutte posée d'aluminium sur un substrat d'alumine, à 900°C

En réalité, les gouttes d'aluminium fondu n'ont jamais eu des formes satisfaisantes. En effet, les petits morceaux d'aluminium posés sur le substrat étaient censés fondre et former une goutte. Les formes obtenues étaient peu ou pas arrondies. L'explication la plus probable est qu'il y a eu oxydation de la surface du morceau

d'aluminium. La couche d'oxyde résultante a donc empêché la libre formation de la goutte.

La pompe à vide utilisée permettait d'atteindre une pression de 4000 Pa dans le tube d'alumine, ce qui équivaut à une pression partielle d'oxygène d'environ 760 Pa. D'autres essais ont été réalisés en purgeant l'atmosphère interne avec de l'argon. Trois purges par l'argon devraient amener la pression partielle d'oxygène à $5 \cdot 10^{-2}$ Pa. Malgré cette faible pression partielle, les résultats n'ont toujours pas été concluants, toute mesure fiable étant impossible.

Levi ⁽²⁴⁾ mentionne qu'il est possible d'obtenir une couche d'oxyde à l'interface liquide – gaz, suffisamment fine pour ne pas gêner le libre mouvement de l'aluminium liquide, pour des températures supérieures à 900°C et des pressions partielles d'oxygène dans l'atmosphère inférieures à 10^{-15} Pa. Avec le dispositif utilisé pour ce projet, on est donc loin des conditions idéales d'expérimentation. Afin de diminuer davantage la pression à l'intérieur du tube d'alumine, il faudrait utiliser une pompe à diffusion par l'huile et diminuer le nombre de jointures pour minimiser les microfuites.

D'autres essais ont été effectués pour caractériser la mouillabilité des liquides à température ambiante. Ils reprennent le principe de la goutte posée sur le substrat, à l'aide d'une pipette. Deux liquides (eau et huile) et deux types de substrat (béton *B* et matrice *B*) ont été utilisés. On doit signaler ici un fait important : l'angle de mouillage d'un liquide par rapport à un solide est normalement défini pour un solide monocristallin pur. Si le solide est composé de différentes substances, ce qui est le cas des réfractaires, l'angle de mouillage mesuré est seulement indicatif et ne peut pas faire office de valeur standard. De plus, il doit être représentatif de l'ensemble du réfractaire. La taille de la goutte étant en général de la taille des plus gros agrégats, les mesures peuvent correspondre soit à une région riche en matrice, soit à une région riche en agrégats. C'est pourquoi des substrats composés seulement de la matrice du matériau *B* ont été aussi utilisés, afin d'homogénéiser la composition chimique et la granulométrie.

Cependant les substrats composés de matrice présentent l'inconvénient d'avoir une forte porosité.

La porosité, aussi bien celle de la matrice que celle de l'ensemble du béton, ainsi que le caractère très mouillant des liquides utilisés, font que la goutte posée est presque immédiatement absorbée par le substrat. Il n'est donc pas possible de prendre de photographie de la goutte. Un dispositif a été imaginé afin de garder la goutte à la surface du substrat. Il s'agit d'exercer une pression d'air de l'autre côté du substrat, afin de compenser l'effet de capillarité et la gravité, et donc de maintenir la goutte à la surface. Les surfaces latérales de l'échantillon ont été soigneusement isolées et rendues hermétiques ; seules les faces inférieures et supérieures contribuent à la circulation de l'air. Lorsque une pression apparemment adéquate a été trouvée, les résultats ont montré que la goutte n'est plus absorbée de façon brusque. Cependant, elle ne reste pas stable suffisamment longtemps pour pouvoir obtenir des mesures fiables (voir la figure 4.14).

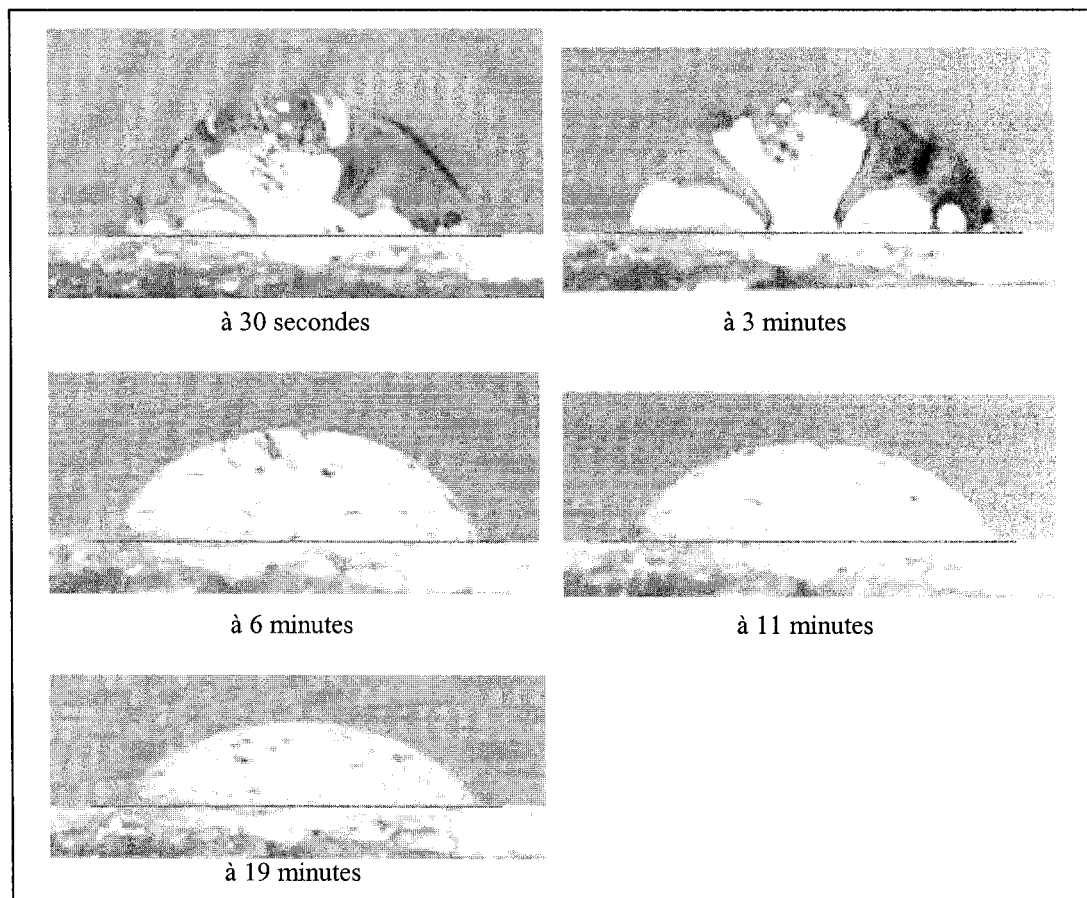


Figure 4.15 : Évolution de la forme d'une goutte d'eau sur un substrat aluminosilicaté poreux

En effet, la distribution en taille entraîne des différences de pression selon la taille des pores : les pores les plus gros n'exerceront pas une pression d'air suffisante pour maintenir liquide à l'extérieur du substrat. À l'inverse, si la pression d'air est plus élevée, les pores les plus gros vont laisser passer l'air qui va se retrouver à l'état de bulles dans le liquide, et donc modifier la forme de la goutte.

La caractérisation des propriétés de mouillage pour les liquides à température ambiante, aussi bien que pour les métaux fondus, par rapport aux substrats réfractaires, est une tâche ardue, soumise à d'importantes contraintes pratiques. En l'absence de

résultats expérimentaux fiables, on utilisera dans la suite les valeurs théoriques issues de la littérature, pour un substrat d'alumine, données dans le tableau 4.6.

	Angle de mouillage (°)	Tension superficielle (dynes/cm)
Eau à 20°C	-	72.75
Aluminium à 800°C	113	483

Tableau 4.6 : Données sur la mouillabilité de l'eau et de l'aluminium fondu

4.3. CONCLUSION DE LA SECTION 4

L'ensemble du système « infiltrant – infiltré » a donc été étudié par diverses techniques de caractérisation. Le système poreux des trois bétons réfractaires choisis (*A*, *B*, *C*), tout d'abord, dépend de la composition chimique des matériaux : une plus grande teneur en ciment va demander une plus grande quantité d'eau lors du gâchage du béton, et donc engendrer une plus grande porosité après déshydratation du béton. De plus, la présence de fibres organiques peut modifier de manière importante la porosité, mais aussi la structure géométrique poreuse. La porosité du béton dépend aussi d'un autre paramètre : la granulométrie du béton. La taille des grains composant le béton doit suivre une certaine distribution, de telle manière à contrôler la porosité et améliorer la compacité du mélange de grains. Lors de la cuisson, les bétons peuvent gagner encore en densification. Les courbes de dilatométrie nous ont montré, par exemple, que la présence de fumée de silice, rend les bétons après cuisson un peu plus denses. Les mesures de porosité ouverte révèlent des valeurs décroissantes pour *A*, *B*, *C*, respectivement. Cependant, les matrices de ces bétons ont une porosité ouverte beaucoup plus importante (la plus élevée pour *B* et *C*), probablement à cause de la distribution granulométrique propre à la matrice.

La porosité n'est pas le seul paramètre caractérisant la structure poreuse. La taille des pores influe beaucoup aussi sur la cinétique d'infiltration. Ainsi, les mesures de porosimétrie par intrusion au mercure ont permis de mettre en évidence, pour chacun de

matériaux, une distribution en taille de pore. Deux données statistiques ont été aussi extraites des mesures : la taille moyenne des pores et la surface totale poreuse. Alors que *B* possède la plus grande taille moyenne de pores, *A* montre la plus grande surface poreuse. Par ailleurs, des observations au microscope optique ont permis de classifier la structure poreuse en trois groupes : les bulles de coulage, la porosité interfaciale autour des agrégats et la porosité matricielle composée de capillaires dans la matrice.

La caractérisation des liquides infiltrants s'est révélée plus délicate. Parmi les trois liquides étudiés, deux existent à température ambiante (une solution aqueuse de bleu de méthylène et une huile de boîte de transmission) et le dernier est l'aluminium fondu. La densité et la viscosité des liquides à température ambiante ont été déterminées expérimentalement, alors que les données pour l'aluminium fondu proviennent de la littérature. La caractérisation de la mouillabilité est un processus encore imparfait et extrêmement sensible aux conditions environnementales. Des essais par la méthode de la goutte posée ont été effectués sur les trois liquides, mais les résultats n'ont pas été satisfaisants.

La caractérisation du système permet désormais de se baser sur des données expérimentales pour expliquer les résultats des essais d'infiltration.

5. ÉTUDE DE LA CINÉTIQUE D'INFILTRATION PROPOSÉE

Les essais expérimentaux menés dans le cadre de ce projet ont consisté en l'infiltration des réfractaires sélectionnés, à température ambiante, par deux liquides infiltrants différents. L'évolution du front d'infiltration a permis de déduire une cinétique d'infiltration selon les paramètres imposés.

Cependant, on a observé de fortes différences dans les cinétiques d'infiltration, dues à l'hétérogénéité micro- et macrostructurale du matériau réfractaire. Ainsi il est apparu rapidement deux effets issues de cette hétérogénéité : l'effet d'échelle et l'effet de peau.

5.1. QUELQUES OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES

Un premier essai d'infiltration avec un liquide fortement coloré (une solution de bleu de méthylène) a permis de mettre en évidence certaines affirmations relativement communes. Tout d'abord, en considérant la photographie de la figure 5.1, on constate que les agrégats sont bien plus difficilement infiltrés que la matrice. En effet, la porosité ouverte des agrégats est en général très faible comparativement à celle de la matrice (de 0 % pour les bétons cimentés à grains non poreux à 14 % pour les bétons à faible teneur en ciment et à grains poreux, en pourcentage volumique absolu ⁽²⁶⁾). On peut donc en déduire que la cinétique d'infiltration dans un béton est majoritairement contrôlée par la porosité matricielle.

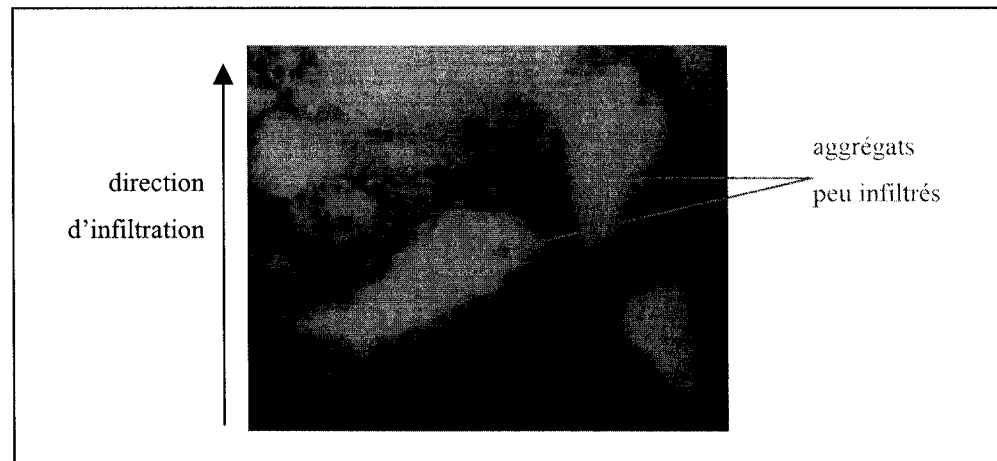


Figure 5.1 : Comparaison entre l'infiltration de la matrice et l'infiltration des agrégats d'un béton réfractaire

Cependant, la présence des agrégats crée une hétérogénéité dans la microstructure du béton en jouant le rôle d'obstacles au cours de l'infiltration. De plus, la répartition des agrégats dans un béton ne sera jamais parfaite et il existera des endroits dans le béton plus riches en agrégats que d'autres. Il en résulte des zones plus ou moins difficiles à infiltrer. Comme on le voit sur la figure 5.2, la zone gauche de l'échantillon contient moins d'agrégats (représentés par les taches vertes) et a été infiltrée sur une plus grande distance que la zone droite.

De ces premières observations, apparaît une problématique : comment évaluer la taille de ces zones ? La prise en considération de cet effet d'échelle devrait permettre d'effectuer des essais d'infiltration sur des échantillons suffisamment larges pour obtenir des résultats représentatifs du béton dans son ensemble, et donc reproductibles. On doit alors établir une largeur minimale d'échantillon, pouvant couvrir plusieurs « zones d'hétérogénéité ». Il est de coutume, dans les milieux réfractaristes, de considérer qu'un échantillon ayant une épaisseur correspondant à 4 ou 5 fois la taille maximale des agrégats (soit environ 25 mm) est suffisamment large pour minimiser l'effet de l'hétérogénéité microstructurelle. En supposant qu'une « zone

d'hétérogénéité » dans le cas de l'infiltration ait une taille maximale de 25 mm, un échantillon qui aurait une largeur de plus de 25 mm, devrait comporter sur sa largeur au moins deux zones d'hétérogénéité, c'est-à-dire une zone relativement riche en agrégats et une zone relativement pauvre en agrégats. Finalement, pour obtenir des mesures moyennes lors des essais d'infiltration, il devrait être nécessaire de travailler avec des échantillons ayant une largeur pouvant couvrir au moins deux zones d'hétérogénéité dans leur totalité, soit une largeur d'au moins 50 mm.

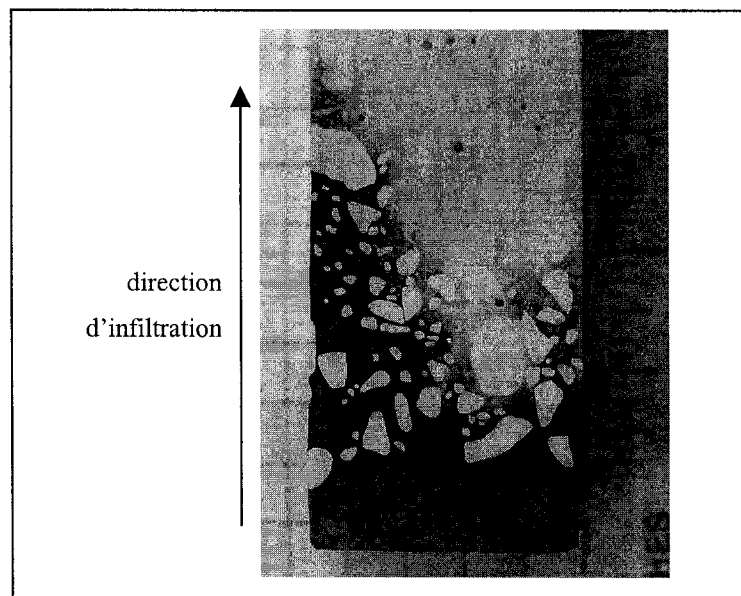


Figure 5.2 : influence des concentrations locales d'agrégats (colorisés en vert) sur la cinétique d'infiltration

En réalité, les échantillons utilisés pour ce projet avaient tous une largeur de 64 mm, ce qui correspond à la largeur des briques de béton fournies. Ainsi, l'usinage s'en trouvait facilité... De plus, les surfaces des échantillons n'ont pas été rectifiées, ce qui signifie que les faces latérales des échantillons correspondent à la surface originale des briques de béton. Les essais ont donc pu mettre en évidence un deuxième effet de la microstructure des bétons sur la cinétique d'infiltration : l'effet de peau.

Suite au coulage du béton, il apparaît une ségrégation des particules à la surface de la pièce en béton ; les particules les plus fines du mélange vont avoir tendance à migrer vers la surface et il se forme alors une couche externe de fines particules, appelée « peau » du béton. L'épaisseur de cette couche est relativement fine, de l'ordre de 1 à 2 mm. Cependant, par sa distribution granulométrique différente de celle du béton, la cinétique d'infiltration qu'elle offre va être en général différente et va donc limiter ou accélérer l'infiltration sur les bords de la pièce en béton.

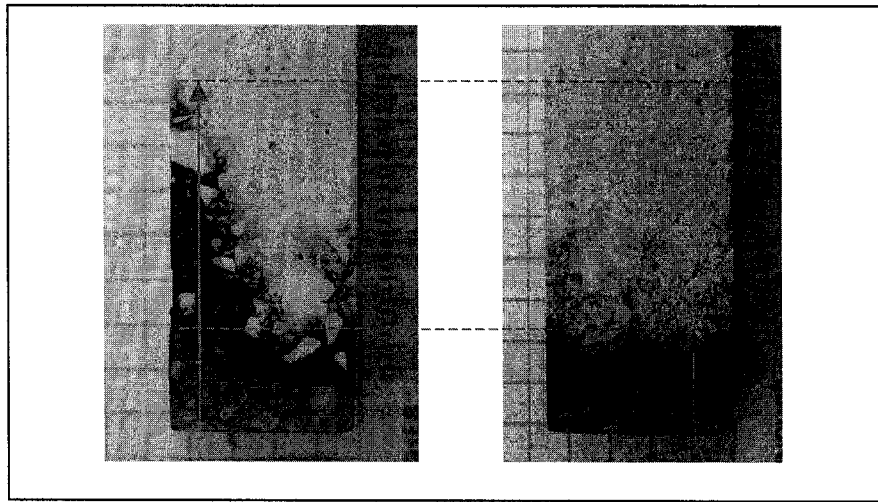


Figure 5.3 : Illustration de l'effet de peau (à gauche, face coupée de l'échantillon et à droite, face originale de l'échantillon)

La figure 5.3 permet d'illustrer cet effet de peau : on peut voir que la cinétique d'infiltration a été plus rapide sur la face coupée (représentant le cœur du béton) que sur la surface originale (représentant la peau du béton). Dans la suite de ce mémoire, on considérera que les particules contenues dans la peau du béton constitue la matrice du béton.

5.2. LE MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Le montage expérimental utilisé pour effectuer des essais d'infiltration à température ambiante est assez simple : il consiste en un réservoir contenant le liquide infiltrant, en contact avec l'échantillon de réfractaire.

Afin d'étudier l'effet de la gravité sur la cinétique d'infiltration, on a décidé de mettre en œuvre deux directions d'infiltration opposées. Une partie des tests a donc été effectuée en infiltration descendante, alors que l'autre partie a été effectuée en infiltration ascendante. Dans le premier cas, la gravité devrait promouvoir une plus grande cinétique d'infiltration, et, dans le second cas, elle devrait au contraire limiter la cinétique d'infiltration. Les deux types de montage sont illustrés sur la figure 5.4.

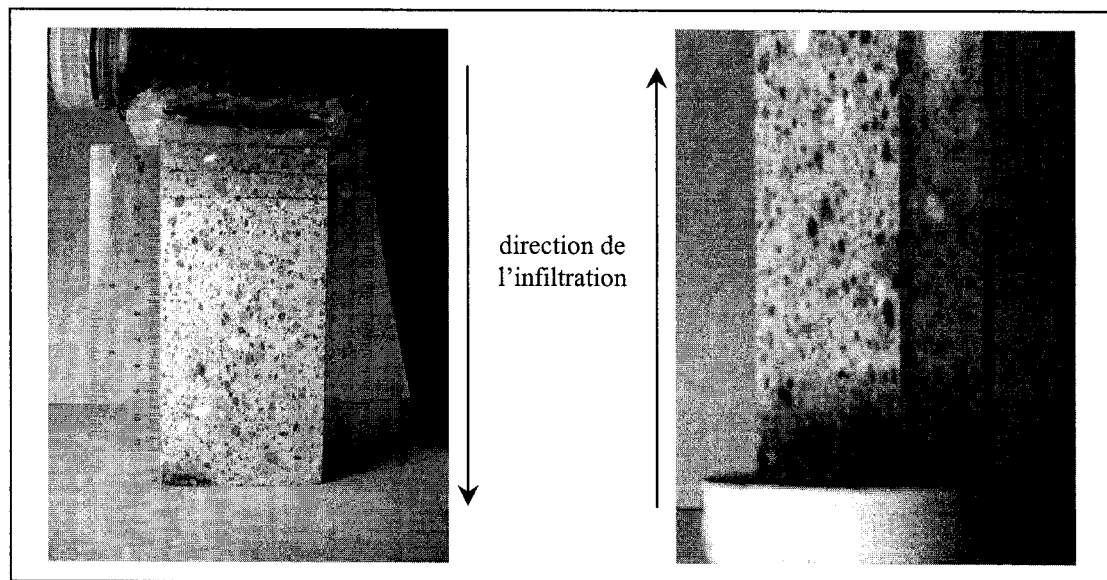


Figure 5.4 : à gauche, essai d'infiltration descendante et à droite, essai d'infiltration ascendante

Tous les échantillons avaient, comme il a été dit dans la section précédente, une largeur de 64 mm. Leur hauteur était d'environ 150 mm et leur épaisseur de 25 mm. Ils offraient tous des tranches latérales non usinées, correspondant à la surface originale du

béton coulé (la peau du béton). La grande majorité des surfaces frontales ont été coupées et correspondent au cœur du béton. Dans le cas des infiltrations descendantes, il se présentait un risque de suintement le long des surfaces extérieures. Pour y remédier, un ruban adhésif transparent de grande largeur a été apposé sur les surfaces extérieures, exceptées celle du haut (servant d'orifice d'entrée de l'échantillon) et celle du bas, afin d'éviter la rétention d'air à l'intérieur de l'échantillon. La présence du ruban adhésif aurait pu, par ailleurs, modifier la cinétique d'infiltration en créant une voie d'écoulement superficielle à l'interface entre le ruban et l'échantillon. Cependant, certains échantillons ont été découpés après l'essai d'infiltration, et la profondeur d'infiltration s'est révélée être la même aussi bien sur la surface extérieure qu'à l'intérieur de l'échantillon. La colle du ruban adhésif a donc parfaitement joué son rôle et il n'y a pas eu d'infiltration à l'interface ruban – échantillon.

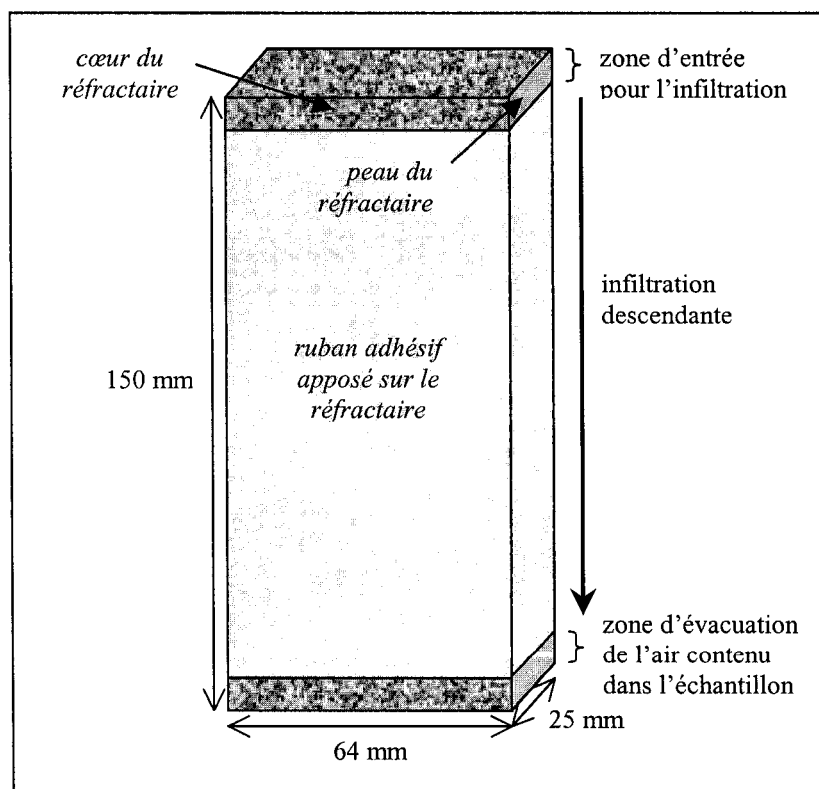


Figure 5.5 : schéma représentatif des échantillons utilisés pour les essais d'infiltration descendante

Afin de mesurer l'évolution du front d'infiltration, des règles graduées ont été disposées à côté des surfaces pénétrées, au même niveau pour éviter le phénomène de parallaxe durant la photographie des échantillons. L'origine des graduations ne correspondait pas en général à l'extrémité de l'échantillon en contact avec le liquide infiltrant. C'est le cas en particulier dans les essais d'infiltration descendante où la partie supérieure de l'échantillon se trouvait immergée dans le réservoir de liquide. Ce n'est pas un problème dans l'exploitation des données expérimentales, puisqu'on utilise un paramètre flottant lors du lissage de courbe afin de retrouver la véritable origine spatiale (voir la section 5.3).

Deux liquides infiltrants ont été utilisés durant les essais :

- une solution aqueuse à 0,5 % de bleu de méthylène
- de l'huile colorée en rouge (utilisée dans les boîtes de transmission automatique des voitures)

	Densité (kg/m ³)	Viscosité (cp)
Solution aqueuse	999	1,1
Huile	851	83

Tableau 5.1 : Densité et viscosité expérimentales des liquides infiltrants, mesurées à 20°C

Le principal intérêt d'utiliser ces deux liquides infiltrants est la possibilité d'étudier l'influence de la viscosité sur la cinétique d'infiltration.

Quoiqu'il en soit, les propriétés des liquides choisis et la géométrie des échantillons semblaient être adéquats : dans le cas des cinétiques d'infiltration les plus rapides, les échantillons ont été infiltrés en une journée, alors que les cinétiques les plus lentes permettaient une infiltration totale en plusieurs jours. Durant l'infiltration, de nombreuses photographies numériques de l'échantillon ont été prises à intervalle de

temps régulier. La lecture de mesures a été effectuée directement par visionnement de l'image sur l'ordinateur. Lorsque le profil d'infiltration était trop irrégulier, la mesure correspondait à la plus grande profondeur d'infiltration. Cependant, l'effet de peau conduisant parfois à une plus grande cinétique d'infiltration, on pouvait discerner assez clairement sur les surfaces frontales un premier profil dû à l'effet de peau et un second profil correspondant au cœur du béton (voir la figure 5.6). Dans ce cas, des mesures distinctes ont été effectuées pour chaque profil.

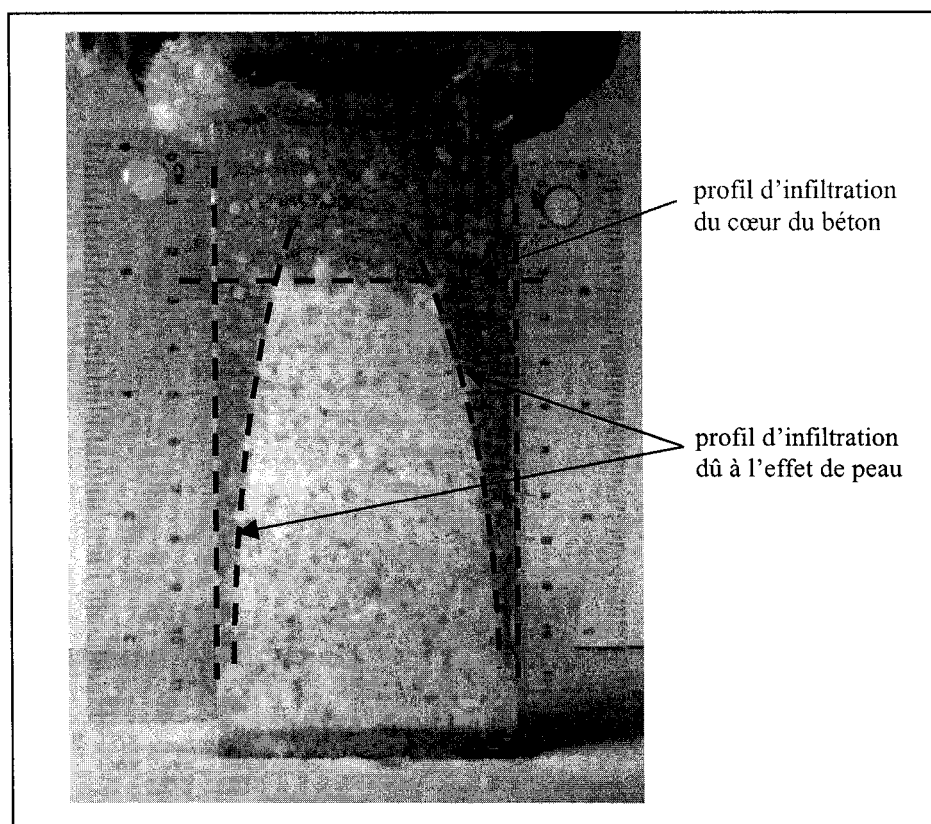


Figure 5.6 : Les différentes composantes d'un profil d'infiltration

Finalement, le tableau 5.2 réunit toutes les conditions d'infiltration utilisées durant les essais, ainsi qu'une schématisation des profils d'infiltration obtenus.















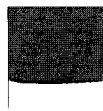

Solution aqueuse	<i>infiltration descendante</i> échantillon A-1 Face 1  Face 2 	<i>infiltration descendante</i> échantillon B-2  échantillon B-3 Face 1  Face 2 	<i>infiltration descendante</i> échantillon C-1 Face 1  Face 2 
	<i>infiltration ascendante</i> échantillon A-2 	<i>infiltration ascendante</i> échantillon B-4 	
Huile	<i>infiltration ascendante</i> échantillon A-3 Face coupée  Face originale 	<i>infiltration ascendante</i> échantillon B-5 Face coupée  Face originale 	<i>infiltration ascendante</i> échantillon C-3 
	<i>infiltration descendante</i> échantillon A-4 		<i>infiltration descendante</i> échantillon C-4 

Tableau 5.2 : Tableau récapitulatif des conditions expérimentales et des profils d'infiltration obtenus

5.3. EXPLOITATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

L'ensemble des mesures issues des essais d'infiltration ont été consignés en annexe A, sous forme de courbes représentant la profondeur d'infiltration en fonction du temps. On peut noter que le temps est exprimé en secondes et la profondeur d'infiltration en mètres ; il s'agit des unités S.I., qui ont été préférées afin de simplifier les calculs, même si d'autres unités auraient pu rendre la lecture des mesures plus aisée (en heures et en centimètres, par exemple).

Ces résultats ont été exploités par lissage de courbe. En effet, l'objectif est de pouvoir déterminer certains paramètres caractéristiques à partir des points expérimentaux. Le lissage de courbe est une fonction offerte par certains logiciels, permettant de trouver, pour un type d'équation préalablement défini par l'utilisateur, les paramètres optimaux correspondant aux points dont on a saisi les coordonnées. Ainsi l'équation trouvée devrait permettre de tracer une courbe coïncidant avec les points expérimentaux. En règle générale, les algorithmes utilisés dans les programmes de lissage de courbe sont tous basés sur la méthode des moindres carrés, qui consiste à minimiser la somme des carrés des déviations des valeurs observées par rapport aux valeurs prédites par l'équation. Cependant, on distingue les lissages de courbe linéaires (pour des équations du type $y = A + Bx$) et les lissages de courbe non-linéaires (pour des équations plus complexes).

Dans le cas des lissages non-linéaires, trois méthodes différentes sont couramment utilisées :

- la méthode de Gauss-Newton (elle convertit le problème non-linéaire en un problème linéaire en approximant la fonction choisie par une série de Taylor avec une valeur estimée des paramètres ; elle fonctionne bien si le modèle n'est pas fortement non-linéaire et si la valeur estimée initiale des paramètres est proche de la somme minimale des carrés)

- la méthode de « la descente la plus raide » (elle a l'avantage sur la méthode de Gauss-Newton de ne pas diverger, mais la vitesse de convergence vers la somme minimale des carrés décroît à mesure que l'on s'approche de ce minimum)
- la méthode de Marquardt est une technique d'interpolation entre les deux méthodes précédentes

Le logiciel *Origin* version 5.0, édité par *Microcal*, a été utilisé pour effectuer le lissage des courbes expérimentales. Le lissage des courbes est aussi possible avec *Microsoft Excel*, mais seulement sur un faible nombre d'équations standards. En revanche, *Origin* présente l'avantage de pouvoir effectuer des lissages de courbes à partir d'équations personnalisables. La méthode utilisée est celle de Marquardt.

Dans notre cas, la problématique est de d'abord trouver une équation qui va correspondre au mieux aux données expérimentales. Il est alors nécessaire de s'inspirer de la théorie développée pour décrire le transport d'un fluide dans un réseau capillaire (voir la section 3.2.2). En science des réfractaires, on caractérise souvent l'infiltration d'un réfractaire par l'équation suivante :

$$L = \sqrt{R\chi t} \quad (3.45)$$

où L représente la profondeur de pénétration du fluide dans un capillaire,

R représente le rayon de ce capillaire,

χ est un facteur caractéristique du fluide,

et t est le temps mis pour cette pénétration.

Il s'agit donc d'une loi purement quadratique. Et bien sûr, elle n'est valide qu'en conditions isothermes et en l'absence de réactions chimiques... Cette loi pourrait donc servir d'équation de base pour le lissage des courbes expérimentales.

Si l'on considère le cas de l'échantillon B-4, qui a subi un essai d'infiltration ascendante avec la solution aqueuse de bleu de méthylène, les mesures ont été faites d'une part, au centre de la surface frontale (pour le cœur du béton) et, d'autre part, sur le côté gauche de la surface frontale (pour la peau du béton). Comme on le voit sur la figure 5.7 a), le lissage de courbe, avec la loi quadratique 3.45 pour équation de base (sous la forme $y = A + Bx^2$), permet d'obtenir un bon degré de corrélation.

Ce degré de corrélation est donné par le paramètre χ^2 . Ce paramètre statistique permet d'évaluer les différences entre les données observées dans la distribution expérimentale et les données prévues selon une distribution hypothétique ; plus la valeur de χ^2 est faible, meilleure est la corrélation entre l'équation proposée par le programme et les données expérimentales.

La figure 5.7 b) montre les mêmes mesures expérimentales, ayant subi un lissage de courbe cette fois basé sur un polynôme du second degré (du type $y = A + Bx + Cx^2$). La loi d'infiltration n'est plus alors purement quadratique, mais comporte aussi une composante linéaire. Lorsqu'on consulte les deux courbes a) et b) *de visu*, on ne perçoit pas de différence majeure au niveau de la corrélation : les deux courbes semblent bien coïncider avec les valeurs expérimentales. Cependant, la valeur de χ^2 dans le cas du polynôme (environ 77000) est plus faible que celle dans le cas de la loi quadratique (environ 100000), ce qui signifie, malgré tout, que la corrélation est meilleure dans le lissage par le polynôme. De toute façon, la loi purement quadratique devrait être incluse dans le polynôme du second degré ; si les valeurs expérimentales suivent vraiment la loi quadratique, la composante linéaire du polynôme devrait être quasiment inexistante.

La validité de la loi quadratique est vraiment remise en cause par les figures 5.8 a) et b), représentant respectivement le lissage de courbe par la loi quadratique et par le polynôme du second degré des valeurs expérimentales mesurées pour l'échantillon B-4, sur le côté gauche.

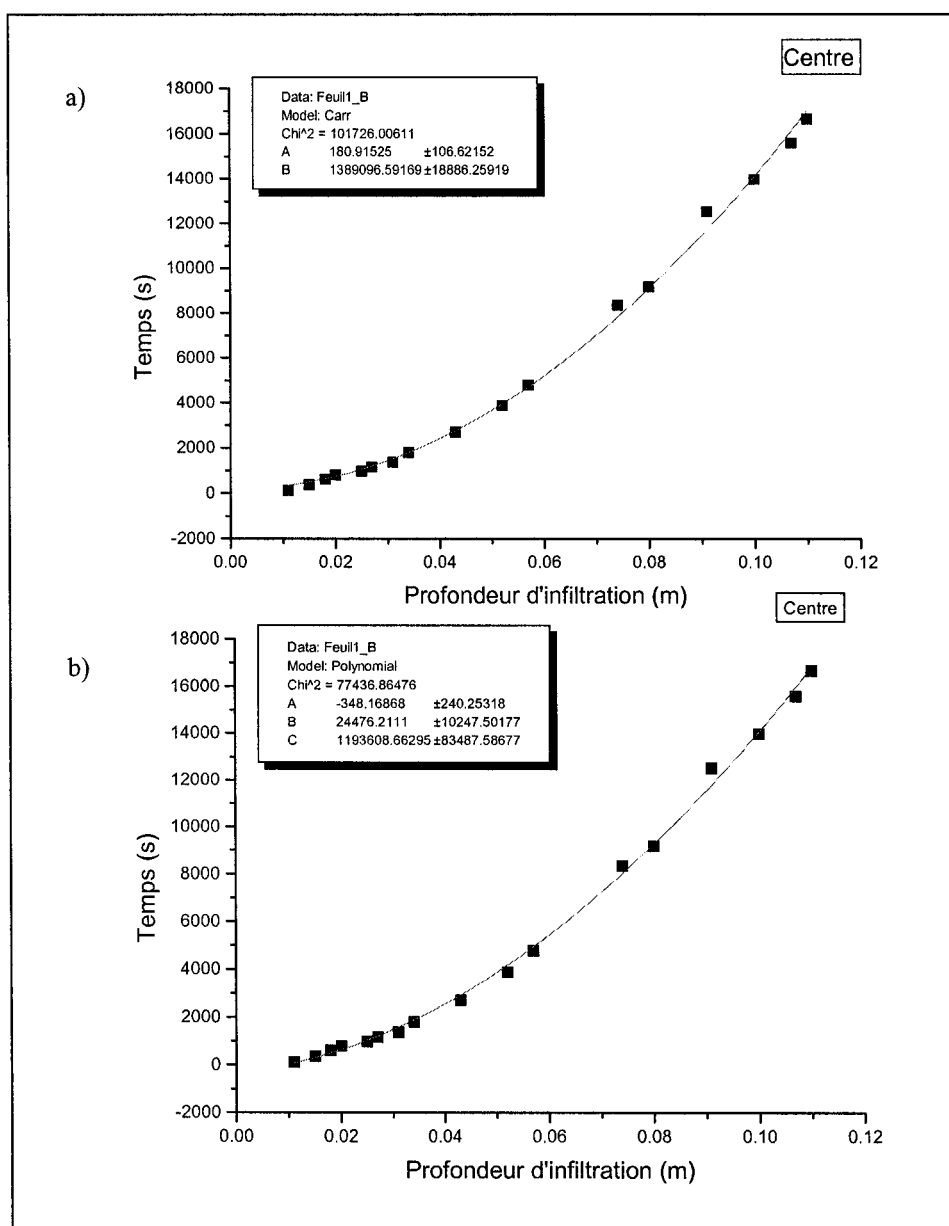


Figure 5.7 : Lissage de la courbe expérimentale pour le centre de l'échantillon B-4, a) par la loi quadratique pure, b) par un polynôme du seconde degré

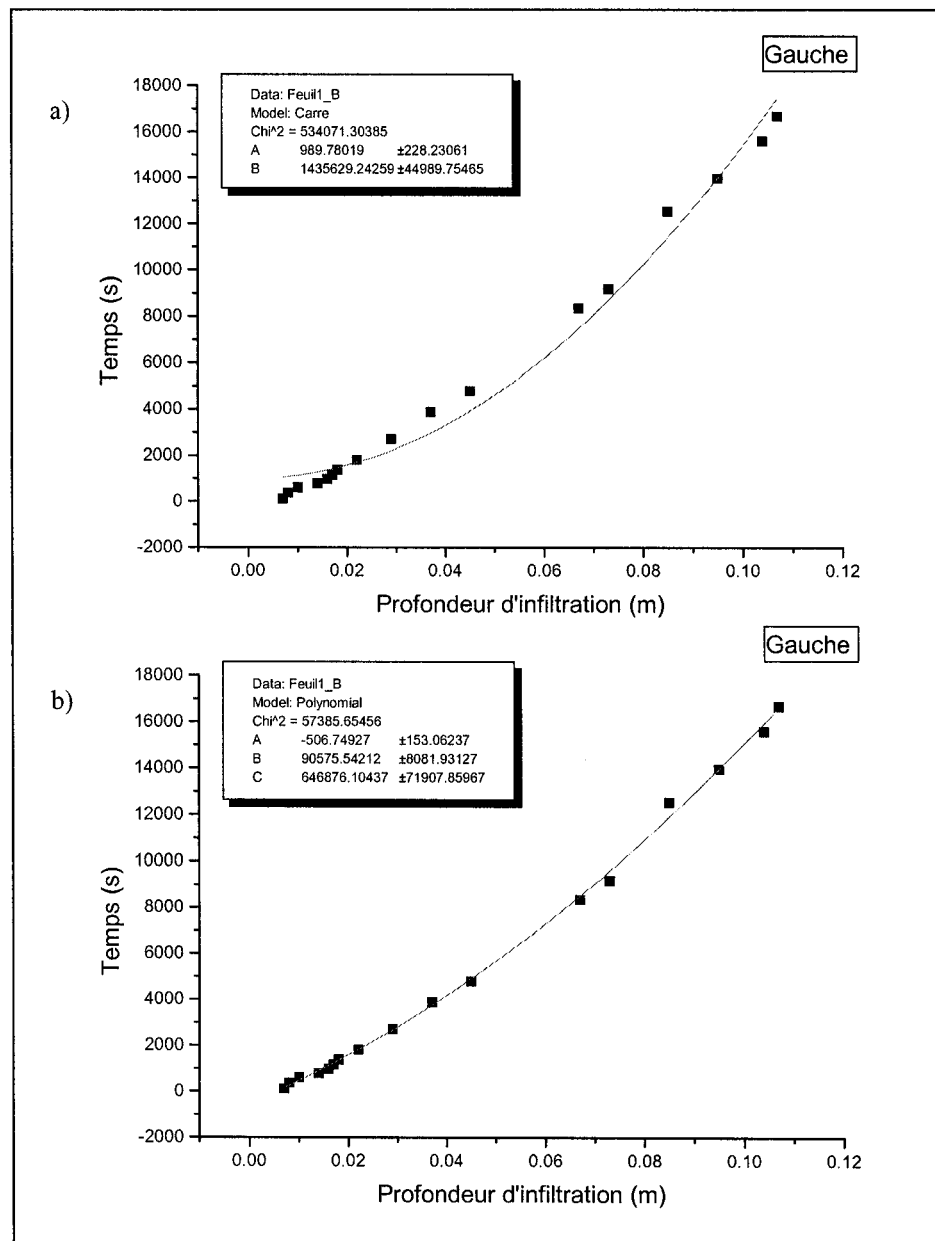


Figure 5.8 : Lissage de courbe expérimentale pour le côté gauche de l'échantillon B-4, a) par la loi quadratique pure, b) par un polynôme du second degré

On voit donc sur la figure 5.8 a) que la corrélation entre la loi quadratique et les valeurs expérimentales est beaucoup moins bonne : la valeur de χ^2 est passée à 534000. La figure 5.8 b) nous montre, au contraire, que la corrélation entre le polynôme et les

valeurs expérimentales demeure correcte (χ^2 est à peu près égal à 57000). Puisque la différence entre les différentes cinétiques d'infiltration représentées sur les figures 5.7 (cas du cœur du béton) et 5.8 (cas de la peau du béton) est probablement due à une structure poreuse différente, on peut donc en déduire un résultat important : la loi quadratique, souvent utilisée pour caractériser la cinétique d'infiltration dans les réfractaires, n'est pas valide pour toutes les structures poreuses présentes dans les bétons. La loi polynomiale permet, au contraire, de mieux modéliser la cinétique d'infiltration.

Ce nouveau modèle présente cependant un désavantage. Alors que la loi quadratique est fondée sur un développement théorique et comporte donc des paramètres intelligibles, la loi polynomiale est purement empirique. Les paramètres de l'équation polynomiale n'ont donc a priori aucun sens physique. Il est difficile de les corréler avec des grandeurs connues.

Ce constat nous entraîne à déterminer un autre modèle, permettant de modéliser la cinétique d'infiltration aussi bien que la loi polynomiale (ou mieux) et représentant des caractéristiques aisément exploitables. Dans la section 3.2.2, une loi plus générale que la loi quadratique a été développée, en prenant en compte des paramètres supplémentaires, tels que la pression métallostatique (ou hydrostatique dans le cas des essais à température ambiante) et la force de gravité exercée sur le liquide infiltré. Cette loi, que l'on appellera loi semi-logarithmique, est exprimée par l'équation suivante :

$$t = \frac{1}{K_v K_g^2} \left[K_g L + (K_c + K_p) \ln \left(\frac{K_c + K_p}{K_c + K_p + K_g L} \right) \right] \quad (3.62)$$

pour laquelle t est le temps mis pour que le capillaire considéré soit pénétré sur une profondeur L ,

K_v est la contribution de la viscosité,

K_g est la contribution de gravité exercée sur le liquide infiltré,

K_c est la contribution de la capillarité,

K_p est la contribution de la pression métallostatique.

À propos des deux derniers paramètres, on peut dire qu'ils sont physiquement similaires ; même s'ils sont engendrés par deux phénomènes différents, K_c et K_p représentent tous les deux des pressions et agissent de la même manière. Il est donc possible de les fusionner en un seul paramètre K_{cp} , correspondant à la somme des deux. Avec cette nouvelle loi d'infiltration, on est alors en présence de trois paramètres distincts, qui peuvent être déterminés par lissage de courbe non-linéaire. En réalité, un quatrième paramètre ($D1$) a été ajouté au processus de lissage de courbe, afin de constituer un paramètre flottant (l'origine spatiale de la courbe n'étant pas connue avec précision).

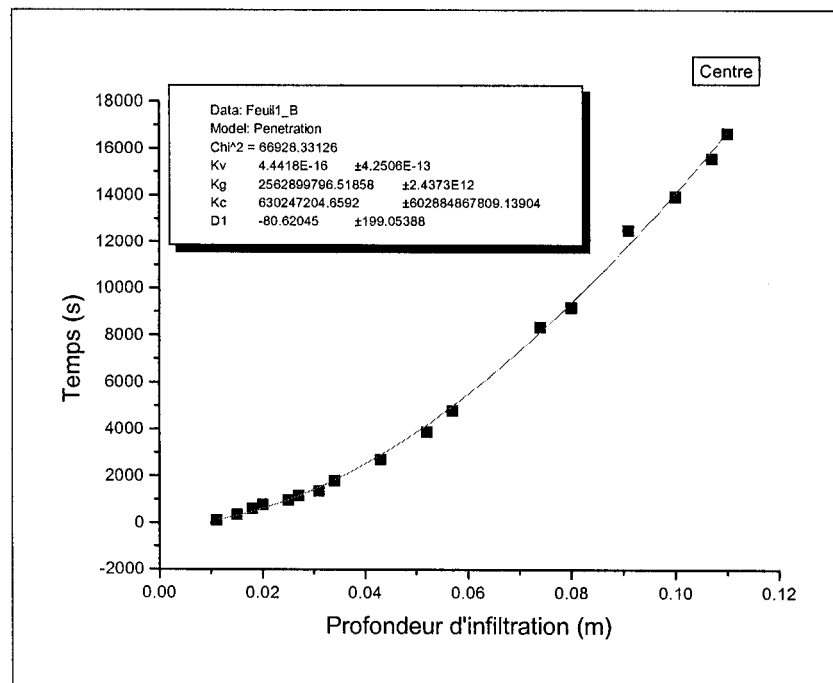


Figure 5.9 : Lissage de courbe expérimentale pour le centre de l'échantillon B-4 par la loi semi-logarithmique

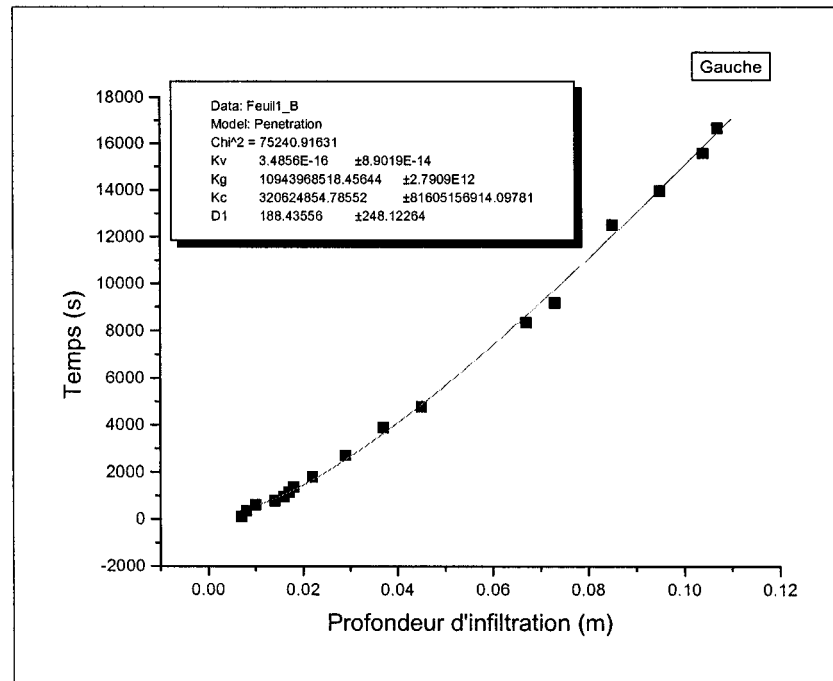


Figure 5.10 : Lissage de courbe expérimentale pour le côté gauche de l'échantillon B-4 par la loi semi-logarithmique

Comme on peut le voir sur les figures 5.9 et 5.10, la corrélation entre les équations proposées et les valeurs expérimentales est très bonne. Le paramètre χ^2 est même meilleur que dans le cas de la loi polynomiale, pour le cœur de l'échantillon (67000 au lieu de 77000). Pour la peau du béton, il est un peu moins bon, mais reste proche de la valeur donnée par la loi polynomiale.

Parmi les trois lois d'infiltration étudiées, la loi semi-logarithmique semble être la plus adaptée : elle fournit en effet une très bonne corrélation avec les valeurs expérimentales et elle se traduit par des paramètres caractéristiques K_g , K_v et K_{cp} physiquement explicables. Le lissage de courbe a donc été appliqué à l'ensemble des mesures. Les paramètres caractéristiques issus de chaque essai ont été réunis dans les tableaux 5.3 a), b) et c).

a)		$K_v (x10^{-18} \text{ m}^2/\text{Pa/s})$	$K_g (x10^9 \text{ kg/m}^2/\text{s})$	$K_{cp} (x10^6 \text{ Pa})$
	A1 - Centre F1	150	7.2	94
	A1 - Côtés F1	200	12	180
	A1 - Côtés F2	190	12	260
	A1 - Centre F2	100	11	4
	A2 - Centre	110	13	320
	A2 - Gauche	190	-5.4	1000
	A2 - Droite	69	18	320
	A2 - Décoloré	140	-14	3500
	A3 - Centre	61	1.3	42
	A3 - Côtés	63	1.3	44
	A4 - Centre F1	48	1.4	13
	A4 - Gauche F1	1.7	40	180
	A4 - Droite F1	1.1	83	8.2
	A4 - Centre F2	0.66	130	300
	A4 - Gauche F2	0.61	140	140
	A4 - Droite F2	0.42	190	500

b)		$K_v (x10^{-18} \text{ m}^2/\text{Pa/s})$	$K_g (x10^9 \text{ kg/m}^2/\text{s})$	$K_{cp} (x10^6 \text{ Pa})$
	B1 - Centre	680	-3.7	590
	B2 - Centre F1	250	-2.7	1100
	B2 - Droite F1	390	7.6	140
	B2 - Centre F2	860	-5.2	600
	B2 - Droite F2	660	4.3	41
	B3 - Centre F1	820	3	260
	B3 - Gauche F1	780	2.7	230
	B3 - Droite F1	810	2.2	260
	B3 - Centre F2	850	2.7	270
	B3 - Gauche F2	810	1.9	250
	B3 - Droite F2	950	-0.26	360
	B4 - Centre	440	2.6	630
	B4 - Gauche	350	11	320
	B5 - Centre	87	0.25	50
	B5 - Côtés	80	0.096	46

c)		$K_v (x10^{-18} \text{ m}^2/\text{Pa/s})$	$K_g (x10^9 \text{ kg/m}^2/\text{s})$	$K_{cp} (x10^6 \text{ Pa})$
	C1 - Centre F1	660	-1.9	420
	C1 - Gauche F1	300	5.3	610
	C1 - Droite F1	320	1.6	800
	C1 - Centre F2	170	7.9	600
	C1 - Gauche F2	220	1.3	1300
	C1 - Droite F2	220	-0.39	1300
	C3 - Centre	34	-1.3	34
	C3 - Gauche	36	-1.2	66
	C3 - Droite	81	-2.3	60
	C4 - Gauche F1	18	0.26	23
	C4 - Droite F1	5	-0.077	6.6
	C4 - Gauche F2	14	-0.12	16
	C4 - Droite F2	13	1.6	8.8

Tableau 5.3 : Paramètres caractéristiques issus des essais d'infiltration

Pour pouvoir tirer des enseignements de ces résultats, il faut se rappeler la définition de chaque paramètre caractéristique :

$$K_v = \frac{R^2}{8\eta} \quad (5.1)$$

$$K_g = \rho g \cos \beta \quad (5.2)$$

$$K_{cp} = \frac{2\sigma_{lg} \cos \theta}{R} + \rho g(h_0 - h) \quad (5.3)$$

où R représente le rayon du capillaire,

η est la viscosité dynamique du liquide,

ρ est la densité du liquide,

g est l'accélération gravitationnelle,

β est l'angle d'orientation du capillaire,

σ_{lg} est la tension superficielle du liquide par rapport à l'air,

θ est l'angle de mouillage,

(h_0-h) est la position du capillaire par rapport au bain.

En considérant d'abord les valeurs expérimentales de K_v , on constate qu'elles sont très faibles ; en effet, si l'on se sert des données expérimentales concernant le rayon des pores et la viscosité du liquide (voir sections 4.1.5 et 4.2), soit R de l'ordre du demi-micromètre et η de l'ordre du centipoise pour la solution aqueuse, on obtient de valeurs estimées de K_v qui sont environ 200 fois plus élevées que les valeurs issues du lissage de courbe. On peut éventuellement se demander si l'on peut se servir de la valeur moyenne du diamètre des pores, mesurées lors des essais de porosimétrie, comme diamètre effectif des pores. Une autre possibilité serait de se servir du diamètre maximal des pores, afin de se placer dans la limite supérieure de la cinétique d'infiltration. Mais la valeur estimée de K_v serait alors encore plus éloignée des valeurs expérimentales... Enfin, même dans le cas où on considère le diamètre le plus faible des pores, on aurait des valeurs estimées de 4 à 8 fois supérieures aux valeurs expérimentales.

Cependant, en comparant les valeurs de K_v dans le cas de la solution aqueuse et celles dans le cas de l'huile, on peut voir que le rapport des viscosités est approximativement respecté (environ 1 pour 80). Puisque l'influence de la viscosité semble représenté par les valeurs expérimentales, on peut calculer un rayon de pore équivalent à partir des données expérimentales de K_v et des mesures de viscosité. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau 5.4. On voit alors que les faibles valeurs de K_v se traduisent par des rayons de pores très petits (de l'ordre du nanomètre).

En revenant au tableau 5.3, on peut aussi s'apercevoir que les valeurs de K_g sont excessivement élevées. Encore une fois, en se servant des mesures de densité, on trouve des valeurs estimées de K_g qui sont environ 1000000 fois plus faibles que les valeurs expérimentales issues du lissage de courbe. Ces valeurs expérimentales se présentent comme si l'on était en présence de liquides très denses...

Un autre fait surprenant est le signe des valeurs de K_g . En effet, K_g est censé représenter l'effet de la force de gravité sur le liquide infiltré. Dans le cas d'une infiltration descendante, K_g devrait avoir une valeur positive (la gravité accélère alors la cinétique d'infiltration), et dans le cas d'une infiltration ascendante, K_g devrait avoir une valeur négative (la gravité limite alors la cinétique d'infiltration). Lorsque l'on consulte les valeurs expérimentales de K_g , on voit que le signe obtenu respecte rarement ce principe. Que peut-on déduire de cette constatation ? On peut tout d'abord affirmer que l'effet de la gravité n'est pas très important, voire négligeable, pour les liquides infiltrants choisis. Dans le cas contraire, on aurait obtenu une meilleure correspondance entre le signe attendu et le signe obtenu. Par ailleurs, comme on l'a signalé précédemment, les valeurs absolues de K_g sont très élevées. Il est pour l'instant difficile de faire le lien entre le fait que la contribution de la gravité soit négligeable et ces valeurs absolues exceptionnellement élevées... Une explication est cependant proposée dans la section 5.4.

a)

	$t_{2.5}$ (heures)	Re (nm)	Lc (cm)	θ ou Kp
A1 - Centre F1	2.8	1.10	-1.3	44.7°
A1 - Côtés F1	1.2	1.27	-1.5	65 MPa
A1 - Côtés F2	1	1.24	-2.2	142 MPa
A1 - Centre F2	5.9	0.90	-0.03	88.6°
A2 - Centre	1.5	0.94	-2.5	165 MPa
A2 - Gauche	0.5	1.24	18.5	882 MPa
A2 - Droite	2.1	0.74	-1.7	123 MPa
A2 - Décoloré	0.2	1.06	25	3363 MPa
A3 - Centre	22.7	6.33	-3.2	
A3 - Côtés	21.3	6.43	-3.4	
A4 - Centre F1	53.2	5.61	-0.9	
A4 - Gauche F1	67.6	1.05	-0.5	
A4 - Droite F1	74.4	0.85	0	
A4 - Centre F2	62.5	0.66	-0.2	
A4 - Gauche F2	70.7	0.63	-0.1	
A4 - Droite F2	65.5	0.52	-0.3	

b)

	$t_{2.5}$ (heures)	Re (nm)	Lc (cm)	θ ou Kp
B1 - Centre	0.2	2.34	15.9	528 MPa
B2 - Centre F1	0.3	1.42	40.7	998 MPa
B2 - Droite F1	0.9	1.77	-1.8	58 MPa
B2 - Centre F2	0.2	2.63	11.5	545 MPa
B2 - Droite F2	1.2	2.3	-1	49.6°
B3 - Centre F1	0.3	2.57	-8.7	203 MPa
B3 - Gauche F1	0.4	2.5	-8.5	172 MPa
B3 - Droite F1	0.4	2.55	-11.8	203 MPa
B3 - Centre F2	0.3	2.61	-10	214 MPa
B3 - Gauche F2	0.4	2.55	-13.2	193 MPa
B3 - Droite F2	0.3	2.76	138.5	307 MPa
B4 - Centre	0.3	1.88	-2.4	553 MPa
B4 - Gauche	0.5	1.68	-2.9	233 MPa
B5 - Centre	18.4	7.55	-20	
B5 - Côtés	22.8	7.24	-47.9	

c)

	$t_{2.5}$ (heures)	Re (nm)	Lc (cm)	θ ou Kp
C1 - Centre F1	0.3	2.3	22.1	357 MPa
C1 - Gauche F1	0.4	1.55	-11.5	516 MPa
C1 - Droite F1	0.3	1.6	-50	709 MPa
C1 - Centre F2	0.7	1.17	-7.6	476 MPa
C1 - Gauche F2	0.3	1.33	-100	1191 MPa
C1 - Droite F2	0.3	1.33	333.3	1191 MPa
C3 - Centre	355.8	4.72	2.6	
C3 - Gauche	53.6	4.86	5.5	
C3 - Droite	86.3	7.29	2.6	
C4 - Gauche F1	177	3.44	-8.8	
C4 - Droite F1	3288.4	1.81	8.6	
C4 - Gauche F2	444	3.03	13.3	
C4 - Droite F2	208	2.92	-0.6	

Tableau 5.4 : Critères d'évaluation des essais d'infiltrations

Les tableaux 5.4 a), b), c) rassemblent des critères d'évaluation qui ont été calculés à partir des valeurs expérimentales. Ainsi il a été établi un indice temporel $t_{2,5}$ correspondant au temps nécessaire pour obtenir une infiltration sur 2,5 cm, en se basant sur les équations données par le lissage de courbe. La distance de 2,5 cm semble être une grandeur typique lors de l'infiltration des matériaux réfractaires : les infiltrations sur une profondeur inférieure à 0,5 cm ou supérieure à 10 cm sont rarement considérées... L'indice $t_{2,5}$ permet donc d'avoir rapidement une estimation de la cinétique d'infiltration. D'après les données présentées dans le tableau 5.4, il apparaît que l'indice $t_{2,5}$ est de 10 à 1000 fois plus élevé dans le cas de l'infiltration par la solution aqueuse que dans le cas de l'infiltration par l'huile. On peut en déduire que l'indice $t_{2,5}$ est fortement dépendant de la viscosité du liquide infiltrant, et donc que la viscosité influence grandement la cinétique d'infiltration.

Le second critère d'évaluation est le rayon équivalent Re , dont on a déjà parlé. Ce rayon représente la taille des pores, calculée à partir du paramètre K_v . Les valeurs fournies dans le tableau 5.4 sont de l'ordre du nanomètre ; elles sont donc très petites par rapport aux mesures de porosimétrie (voir section 4.1.5). Les données concernant Re n'ont pas la prétention de représenter la taille réelle des pores. Elles représentent plus probablement la rayon équivalent des capillaires, dans le cadre du modèle d'infiltration proposé. De plus, le rapport des rayons équivalents moyens entre le matériau A et le matériau B $Re(B) / Re(A)$ est égal à 2,14 et le rapport des rayons équivalents moyens entre le matériau B et le matériau C $Re(B) / Re(C)$ est égal à 1,46. On a vu, lors de la caractérisation des matériaux par porosimétrie, que le matériau B présente certes le plus grand diamètre moyen de pore, suivi du matériau A, puis du C (qui possède le diamètre de pore le plus petit). Le rapport des rayons équivalents ne correspond donc pas au rapport des rayons mesurés par porosimétrie. Cependant, il apparaît être inversement proportionnel au rapport des racines carrées des surfaces poreuses totales mesurées par porosimétrie.

Ce constat est très intéressant, car il permet de remettre en place certaines idées reçues concernant les structures poreuses. Il est commun de penser que les tailles des pores mesurées par porosimétrie permet d'évaluer correctement la capacité d'un réfractaire à se laisser infiltrer. En réalité, le principe de la porosimétrie est basé sur la loi de Washburn (voir section 4.1.5), qui assimile la structure poreuse à un ensemble de tubes capillaires. Évidemment, cette représentation est fallacieuse, car les formes géométriques des pores sont beaucoup plus complexes qu'un simple cylindre. La structure poreuse ressemble plus à un réseau fortement connecté de capillaires aux formes complexes. Le paramètre important, dans les phénomènes de transport, n'est pas tant l'ouverture offerte par les capillaires, que la surface offerte par le réseau de canaux. Il faut en effet considérer la structure poreuse davantage comme un continuum que comme une ensemble d'éléments séparés. Une grande surface poreuse peut signifier deux choses : une forte hétérogénéité de la structure et/ou un réseau de canaux de plus grande envergure. Il semble que les résultats précédents tendent à indiquer que la surface totale poreuse correspond à l'envergure du réseau, suite à la corrélation entre les rayons équivalents et l'inverse des racines carrées des surfaces poreuses.

Le troisième critère d'évaluation est le rapport K_{cp} / K_g , appelé Lc . Ce critère a été introduit en section 3.2.2. Lorsque le signe de Lc est positif, la contribution de la gravité devrait entrer en compétition avec la contribution de la capillarité, c'est-à-dire que le liquide devrait s'élever en hauteur pour pénétrer davantage le capillaire. Sa valeur absolue représenterait alors la profondeur maximale d'infiltration, au-delà de laquelle la capillarité ne peut plus compenser la gravité. Lorsque le signe de Lc est négatif, gravité et capillarité devraient contribuer tous deux à l'infiltration du capillaire. Bien évidemment, il n'existe pas, dans ce cas, de limite maximale d'infiltration. Cependant, comme on l'a vu précédemment, le signe des valeurs expérimentales de K_g ne respecte pas les conventions théoriques. Il n'est donc pas possible de considérer Lc comme une estimation de la profondeur maximale d'infiltration. Il est tout de même possible d'utiliser Lc comme un paramètre indicatif concernant la cinétique d'infiltration. En

effet, on constate que la valeur absolue de L_c a tendance à être plus élevée dans les cinétiques d'infiltrations les plus rapides, pour un même réfractaire et pour un même liquide infiltrant. Ceci peut facilement s'expliquer par une plus grande importance de la contribution K_{cp} de la capillarité.

Un dernier critère d'évaluation a été établi afin de mieux cerner les propriétés de mouillabilité. Ce critère consiste à essayer de retrouver l'angle de mouillage à partir des valeurs expérimentales de K_{cp} . Un inconvénient apparaît avec la forme fusionnée de K_{cp} : il n'est pas possible de distinguer la part propre à la capillarité de la part propre à la pression externe. L'astuce a donc consisté à calculer la valeur théorique maximale de la contribution de la capillarité pure. Comme les propriétés de mouillage des liquides infiltrants sont mal connues (voir section 4.2), on s'est limité à faire le calcul pour le cas de la solution aqueuse, à partir de données issues de la littérature concernant l'eau. La contribution maximale de la capillarité a été donc déterminée avec le rayon équivalent R_e , un angle idéal de mouillage de 0° et une tension superficielle de 72,75 dynes/cm. Si cette valeur se révélait être supérieure à la valeur expérimentale de K_{cp} , un nouvel angle de mouillage était calculé à partir de la valeur de K_{cp} . Dans le cas contraire, la différence entre la contribution maximale théorique de la capillarité et la valeur expérimentale donnait une « valeur équivalente » de la contribution de la pression externe. En fait, l'exploitation de ce dernier critère d'évaluation n'a pas été concluante, car elle n'a pas permis de savoir si les 3 à 5 cm de liquide surmontant l'échantillon lors de l'essai d'infiltration descendante ont une réelle influence sur la cinétique d'infiltration. Les valeurs trouvées pour ce critère sont en effet extrêmement diffuses.

L'indice temporel $t_{2,5}$ a donc permis de classer les différentes cinétiques d'infiltration, selon les conditions d'essai. Il est alors possible de trouver lequel des trois matériaux testés est le plus résistant à l'infiltration. Étrangement, la réponse n'est pas simple. En effet, il semblerait, dans le cas de la solution aqueuse, que le matériau A ait en moyenne des indices $t_{2,5}$ plus élevés, ce qui ferait de lui le plus résistant à

l'infiltration. Mais dans le cas de l'huile, le matériau C semble être le plus résistant à l'infiltration. La seule réponse réellement possible est que la résistance à l'infiltration d'un matériau réfractaire ne dépend pas seulement des propriétés du réfractaire, mais va dépendre aussi des propriétés du liquide infiltrant...

En tout cas, l'indice $t_{2.5}$ a aussi permis d'étudier l'influence de l'effet de peau sur la cinétique d'infiltration. Le tableau 5.5 dresse ainsi des comparaisons entre la vitesse d'infiltration V_{mat} dans la peau du béton et la vitesse d'infiltration $V_{bét}$ dans le cœur du béton, pour les trois matériaux mis en jeu.

Béton A	Béton B	Béton C
$V_{mat}^{desc}(SA) > V_{bét}^{desc}(SA)$ $V_{mat}^{asc}(SA) \approx V_{bét}^{desc}(SA)$ $V_{mat}^{asc}(H) \approx V_{bét}^{asc}(H)$ $V_{mat}^{desc}(H) < V_{bét}^{desc}(H)$	$V_{mat} < V_{bét}$	$V_{mat} > V_{bét}$

Tableau 5.5 : Comparaison entre les cinétiques d'infiltration dans la peau et dans le cœur des bétons

Le cas du béton A n'est pas très clair, car aucune tendance franche n'apparaît. Par contre, pour le matériau B, la cinétique d'infiltration est plus lente dans la peau du béton que dans le cœur. Ceci signifie que la peau du béton B joue le rôle de couche protectrice contre l'infiltration, ce qui peut être très intéressant pour limiter le processus de corrosion. On a vu précédemment que le béton B était celui qui possède les pores les plus gros (voir section 4.1.5). Or, si l'on considère que la peau du béton est majoritairement composée de matrice et que la porosité ouverte existe principalement dans la matrice du béton, on peut en déduire que les pores les plus gros sont plus concentrés à l'interface agrégat – matrice. Ainsi la cinétique supérieure d'infiltration

dans le cœur du béton s'expliquerait par une porosité de grande taille de type interfaciale.

Le béton C offre un autre type de configuration : la cinétique d'infiltration dans la peau est plus rapide que dans le cœur. On a vu que la distribution en taille des particules constituant la matrice de C présente des distorsions par rapport à celles de A et B, ce qui pourrait expliquer la plus grande porosité de la matrice du béton C (voir les sections 4.1.2 et 4.1.4).

Finalement, l'obtention d'une couche protectrice contre l'infiltration dans un béton dépend de quelques conditions : une adaptation de la distribution granulométrique et une minimisation de la teneur en ciment pour diminuer la porosité matricielle, et éventuellement un ajout de fines particules modifiant les propriétés de mouillage, telles que des carbures.

L'exploitation des résultats expérimentaux nous a donc permis d'étudier la corrélation entre les paramètres caractéristiques issus d'un développement théorique, tels que K_c , K_g et K_{cp} , et la cinétique réelle d'infiltration. Des corollaires ont été établis pour certains critères d'évaluation de la cinétique d'infiltration et l'effet de peau. Cependant, il a été difficile, à partir de ces résultats expérimentaux, d'étudier la corrélation entre la structure poreuse et la cinétique d'infiltration. Un apport a donc été fait, en vue de cette étude, grâce à un autre développement du modèle théorique : le réseautage du modèle.

5.4. LE RÉSEAUTAGE DU MODÈLE

Le réseautage du modèle consiste donc à créer un réseau théorique constitué d'un ensemble de capillaires aux caractéristiques éventuellement différentes. Chaque capillaire, au lieu, de contribuer séparément au transport de fluide, va désormais être associé aux autres capillaires, pour former un continuum représenté par la trame du

réseau. La représentation conventionnelle du « paquet de pores » (*pores bundle*, en anglais), utilisée jusque là, va être remplacée par le « réseau de pores », comme on peut le voir sur la figure 5.11.

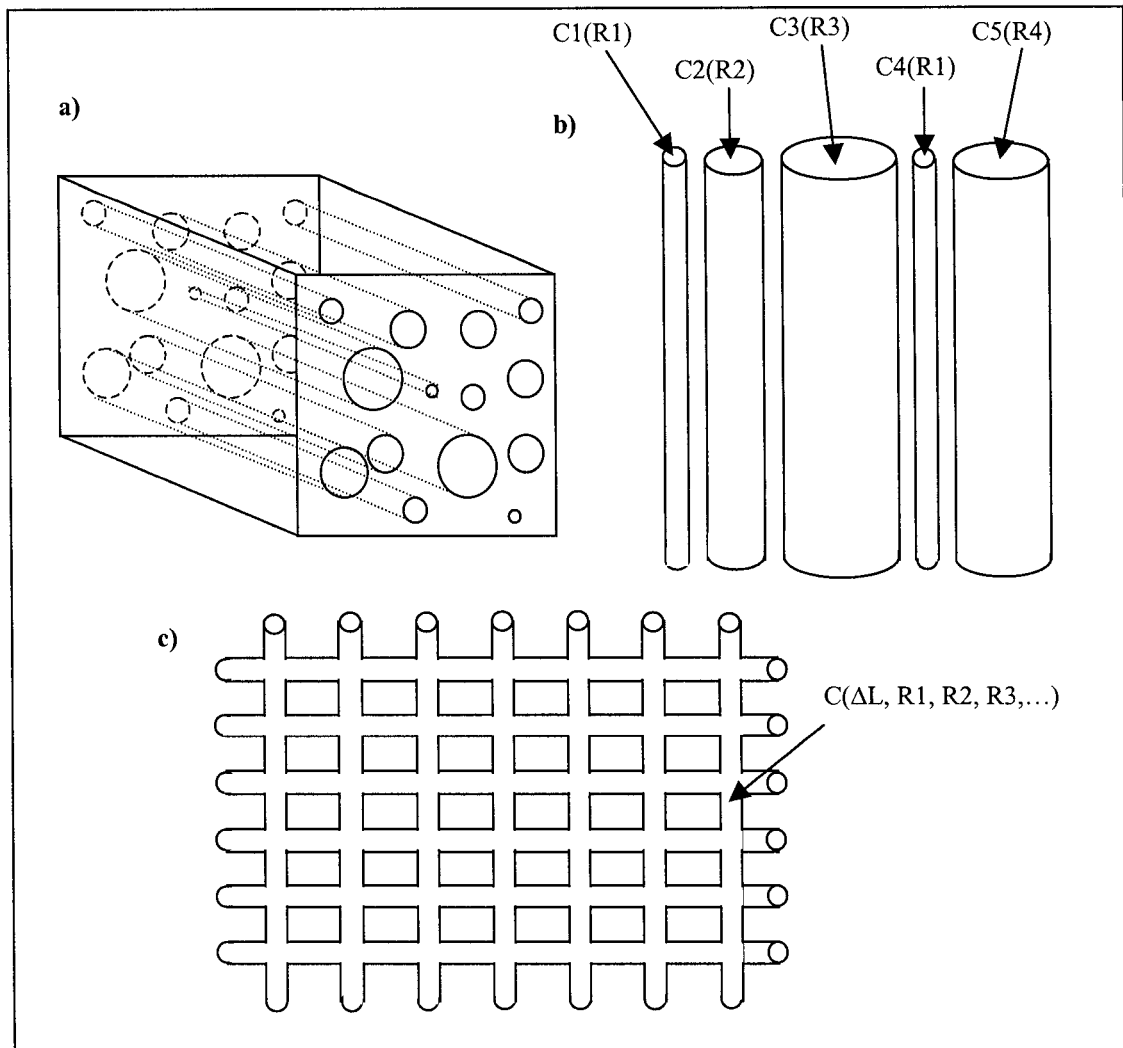


Figure 5.11 : a) représentation tridimensionnelle du paquet de pores,

b) représentation bidimensionnelle du paquet de pores,

c) représentation bidimensionnelle du réseau de pores

Le réseautage du modèle présente trois grands avantages, dans l'étude de la structure poreuse :

- il permet l'association des divers paramètres caractéristiques (la modification de l'un des paramètres va entraîner une modification de l'ensemble du réseau)
- il permet une représentation plus réaliste de la distribution en taille des pores (les petits pores vont interagir avec les grands pores, sur n'importe quel point de la trame du réseau)
- il introduit un nouveau paramètre caractéristique : la connectivité (dont on parlera plus loin)

Le réseautage du modèle entraîne cependant des calculs beaucoup plus importants, puisqu'il y a interaction des capillaires au niveau de chaque nœud du réseau. Il est donc nécessaire, afin de faciliter les procédures, d'utiliser la puissance de calcul d'un ordinateur. Ainsi, un programme informatique a été développé dans le cadre de ce projet, offrant une interface de gestion des données liée aux routines de calcul. Ce programme a été conçu en *Visual Basic*, par la version 6.0 de Microsoft. Le Visual Basic est un langage relativement simple, dont les performances sont largement suffisantes pour les besoins du projet. La version compilée du programme fonctionne sous n'importe quel système d'exploitation Microsoft *Windows*. Le lecteur pourra trouver dans l'annexe B le code de la procédure principale du programme.

Le principe du programme est basé sur un automate cellulaire. Voici la définition de l'automate cellulaire, selon Toffoli ⁽²⁶⁾ : « Un automate cellulaire (en abrégé : AC) est un algorithme informatique spatialement et temporellement discret dans lequel une ou plusieurs variables discrètes sont associées à chaque site d'un réseau. » Chaque site représente un petit élément d'une microstructure de béton réfractaire, et est appelée « cellule ». La représentation choisie pour ce projet est une représentation bidimensionnelle, car il existe une symétrie planaire dans la direction de l'infiltration. Chaque cellule du réseau se comporte comme un processeur booléen ; les valeurs des

variables de chaque cellule (représentant l'« état » de la cellule) sont mises à jour grâce à un petit ensemble de règles régissant le nouvel état de la cellule, et basé sur son état actuel et l'état actuel des cellules environnantes.

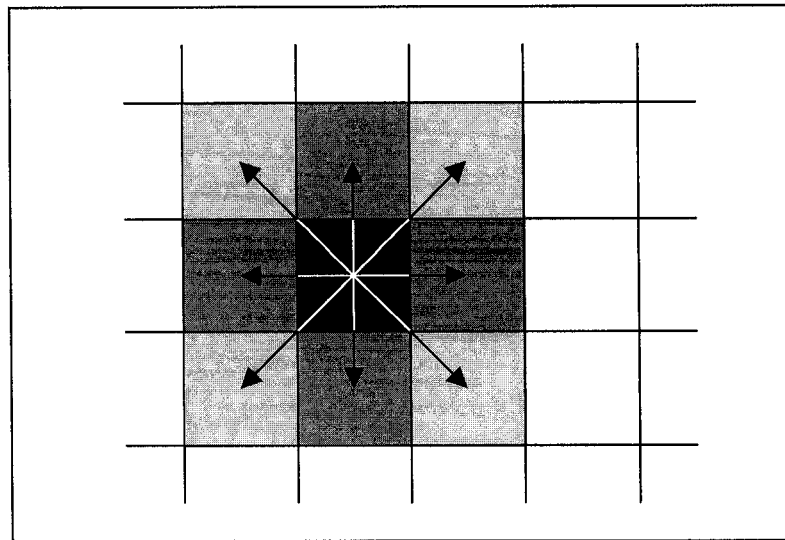


Figure 5.12 : Les différents types d'environnements dans un AC : en gris foncé, environnement de Von Neumann, et en gris clair, environnement de Moore

Les cellules environnantes, pour un réseau carré (comme celui qui a été choisi pour ce projet), sont définies comme étant simplement les premières voisines (environnement de Von Neumann) ou comprenant aussi les secondes voisines (environnement de Moore), comme l'indique la figure 5.12. On a considéré seulement l'environnement de Von Neumann dans le programme, pour des raisons de simplification.

Les règles régissant l'état des cellules, appelées « règles de transition », sont appliquées à chaque cellule en une étape et génèrent un nouvel état du système à l'étape suivante. Dans notre cas, l'état des cellules est défini par deux possibilités : cellule vide ou cellule pleine (remplie par le liquide infiltrant). Les règles de transitions vont donc permettre de savoir lesquelles des cellules vides à l'étape présente seront pleines à l'étape suivante... La variable principale utilisée dans les règles de transition est le

temps t mis pour que la cellule puisse être remplie. Ce temps est calculé à partir du moment où une cellule environnante est elle-même pleine. En réalité, chaque cellule de l'AC symbolise un nœud du réseau de capillaires. Il existe quatre capillaires reliant chacun le centre de la cellule (le nœud, à proprement parler) à l'un des côtés de la cellule, c'est-à-dire à l'une des cellules environnantes (voir la figure 5.13).

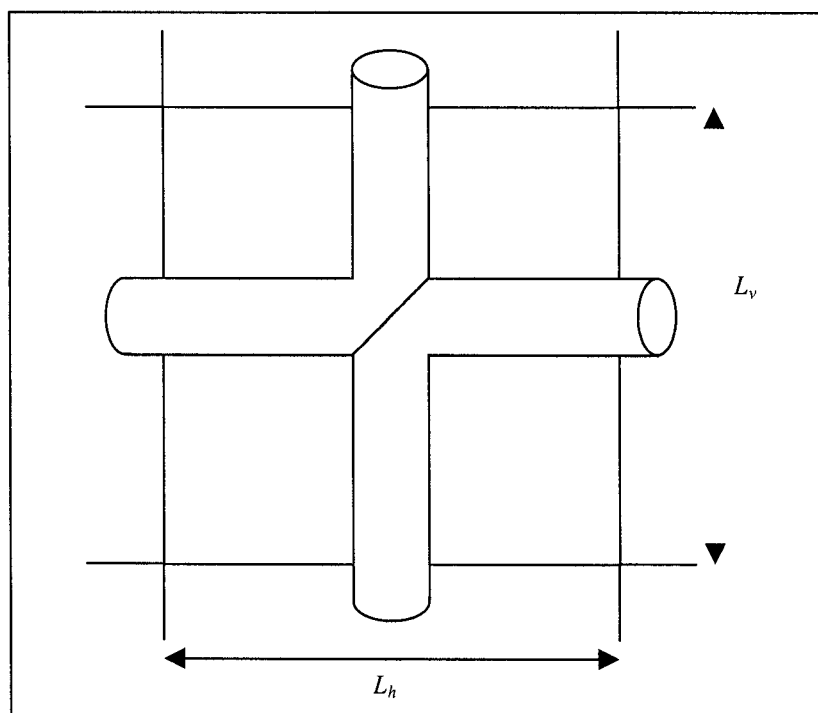


Figure 5.13 : Schématisation du nœud de capillaires par une cellule carrée

La longueur de chaque capillaire est égal à la longueur du côté de cellule correspondant. En général, on considère des cellules carrées de côté de longueur unique L , mais il est aussi possible de considérer des cellules rectangulaires avec les longueurs L_h et L_v . Le temps t mis pour que la cellule soit remplie sera donc déterminé par la règle suivante :

$$t = \frac{1}{K_v K_g^2} \left[K_g L + K_{cp} \ln \left(\frac{K_{cp} + K_g L(n-1)}{K_{cp} + K_g L n} \right) \right] \quad (5.4)$$

Cette équation est en fait la loi d'infiltration proposée en section 5.3. On y reconnaît les paramètres caractéristiques K_v , K_g et K_{cp} . On y voit aussi un nouveau paramètre n : il s'agit de l'« indice de progression » ou « état d'avancement ». Cet indice de progression permet d'assurer la continuité de la cinétique d'infiltration. En effet, en l'absence de cet indice, l'infiltration serait modélisée par des à-coups, ne correspondant pas à la réalité (voir figure 5.14). Chaque cellule se voit attribuer un indice de progression nul, et lorsque la cellule change d'état, l'indice des cellules environnantes est modifié. L'indice permet de reconstituer un capillaire entier pour l'infiltration, à partir de plusieurs cellules. La première des cellules infiltrée a un indice égal à 1 (ce qui correspond à la loi originelle d'infiltration), puis la deuxième cellule prend la valeur 2 pour indice de progression, la troisième prend la valeur 3, etc.

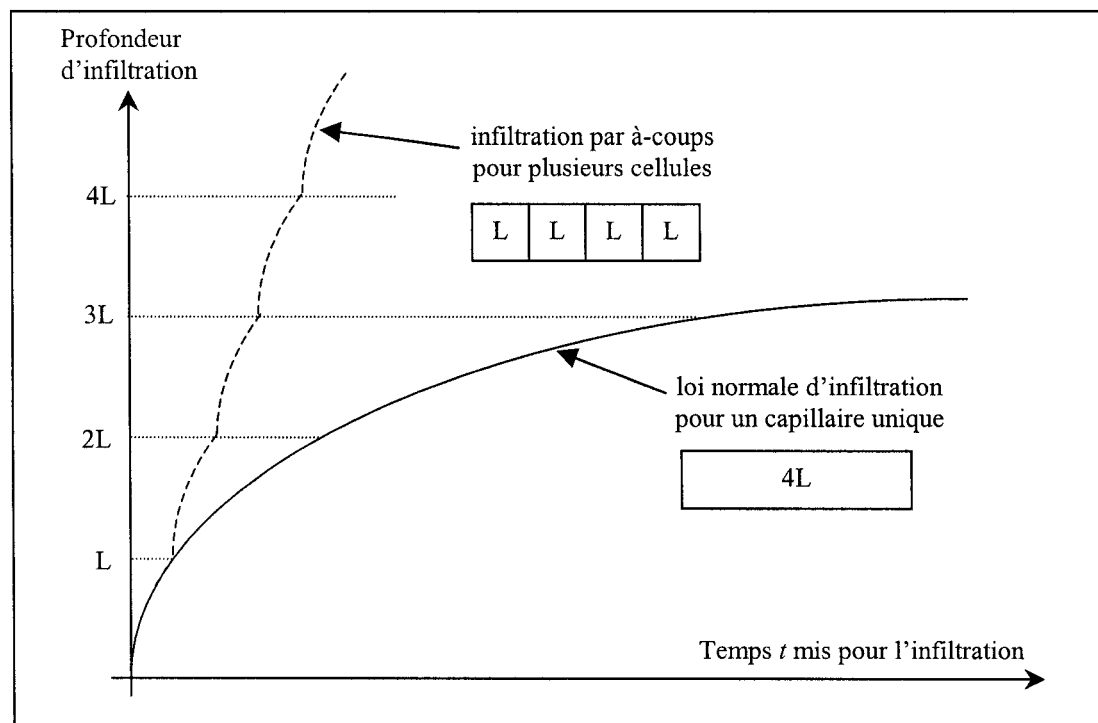


Figure 5.14 : Effet sur la cinétique d'infiltration de la décomposition d'un capillaire en plusieurs cellules

Comme on peut le voir, l'absence d'indice de progression conduit à une large surestimation de la cinétique d'infiltration. On peut noter cependant que l'indice de progression n'a été introduit seulement pour la direction d'infiltration. Dans les directions latérales, l'indice a été omis, afin d'étudier l'effet de la connectivité (qui sera détaillée plus loin). L'omission de l'indice de progression pour les directions latérales va, au contraire, produire une sous-estimation de la cinétique d'infiltration...

Les règles de transition sont donc au nombre de trois :

- la cellule testée doit être voisine d'une cellule pleine
- la pression exercée sur le fluide doit être suffisante pour qu'il puisse infiltrer la cellule testée
- si les deux règles précédentes sont respectées, l'infiltration se fera au bout du temps t donné par la loi (5.4)

La deuxième règle de transition fait intervenir en réalité les conditions aux limites. Les conditions aux limites permettent de transmettre aux cellules qui changent d'état une information indispensable au calcul de la cinétique d'infiltration : la « force motrice », c'est-à-dire la pression exercée sur le fluide. Cette pression est issue de deux composantes :

- la somme de la pression capillaire et de la pression statique (en fait K_{cp}), qui est une donnée connue initialement, avant même que l'infiltration ne commence
- la pression engendrée par la gravité ($K_g \times L$), qui est une donnée qui va se greffer sur la première composante, au fur et à mesure de l'évolution de l'infiltration

La pression engendrée par la gravité se calcule cellule par cellule, à chaque fois que l'une d'elles répond aux règles de transition. Elle est distincte pour chacun des quatre capillaires correspondant à la cellule, puisque ils offrent chacun une direction

différente, et donc une influence de la gravité différente. Finalement, on a quatre conditions aux limites pour chacune des cellules, correspondant aux quatre côtés de la cellule.

Comme on l'a déjà dit, l'AC fonctionne sur le principe d'une discrétisation spatiale et temporelle. La résolution spatiale d'un tel système est définie par le nombre de cellules alloué pour une certaine longueur : plus nombreuses seront le nombre de cellules, plus grande sera la résolution spatiale. La résolution temporelle utilisée dans le programme est en fait double. Elle est basée sur deux échelles de temps : le temps réel et le temps de simulation. Le temps réel est le temps qui devrait être nécessaire à l'infiltration, c'est le temps donné par la grandeur t . Le temps de simulation est divisé en laps de temps, choisi par l'utilisateur. Le programme va effectuer les calculs, jusqu'à ce que le temps réel corresponde au laps de temps. Il va alors faire une pause dans les calculs et montrer à l'utilisateur les résultats au bout du laps de temps. Si l'utilisateur choisi de continuer, l'ordinateur va continuer les calculs sur un nouveau laps de temps identique, qui sera ajouté au temps réel.

On pourrait mentionner une troisième échelle de temps : le temps de calcul. Même si l'évolution de l'infiltration est représentée à l'écran au fur et à mesure que les calculs se font, elle ne se fait pas à la vitesse réelle, mais selon un certain temps de calcul. Le temps de calcul dépend de la puissance de calcul de l'ordinateur et de la résolution spatiale choisie.

La figure 5.15 résume schématiquement le fonctionnement de l'algorithme gérant l'automate cellulaire.

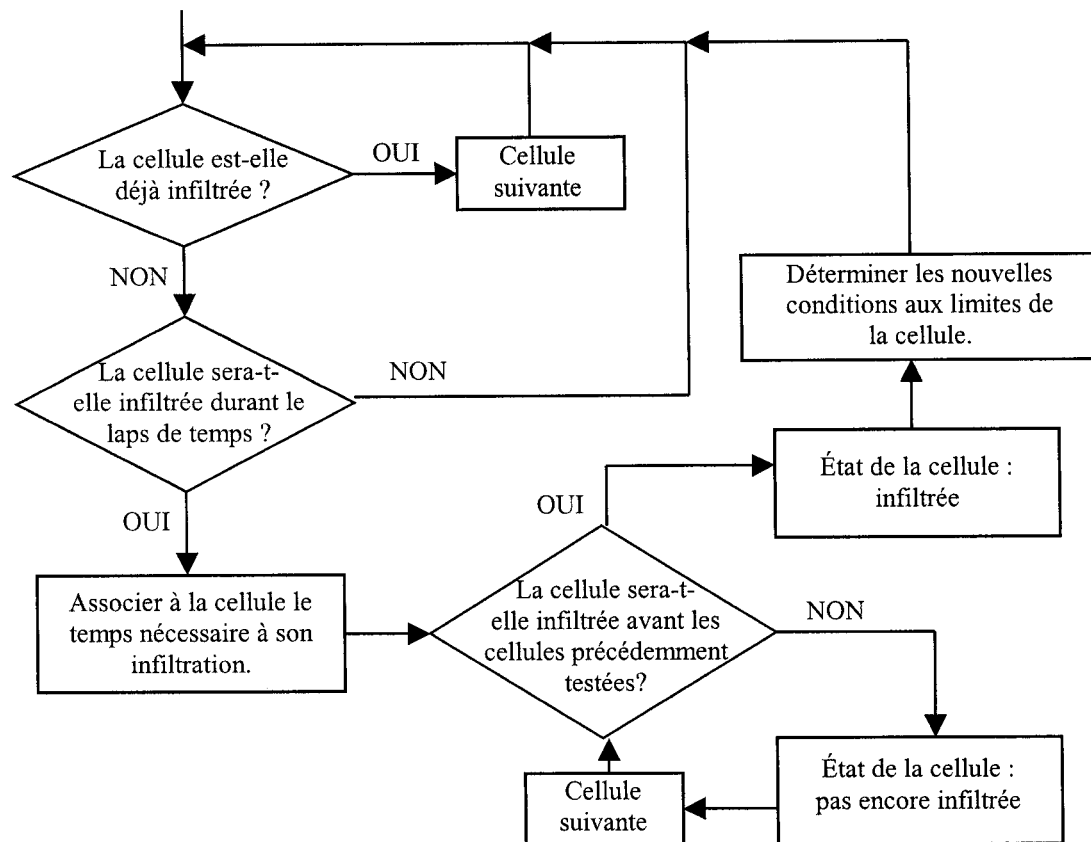


Figure 5.15 : Organigramme simplifié représentant l’algorithme de l’AC

L’interface du programme a été conçue de telle sorte que l’utilisateur puisse avoir facilement accès aux quatre étapes qui constituent la procédure de simulation :

☞ *définition de la géométrie de l’échantillon* (figure 5.16)

Le programme permet d’étudier la cinétique d’infiltration pour des échantillons aux formes diverses (forme rectangulaire horizontale ou verticale, creuset, etc.). L’utilisateur doit ainsi « dessiner » l’échantillon sur un tableau de 4 x 4 cases, et doit situer aussi dans ce tableau la source du liquide infiltrant. La taille réelle des cases est aussi définie, ce qui permet de donner une échelle au plan de l’échantillon.

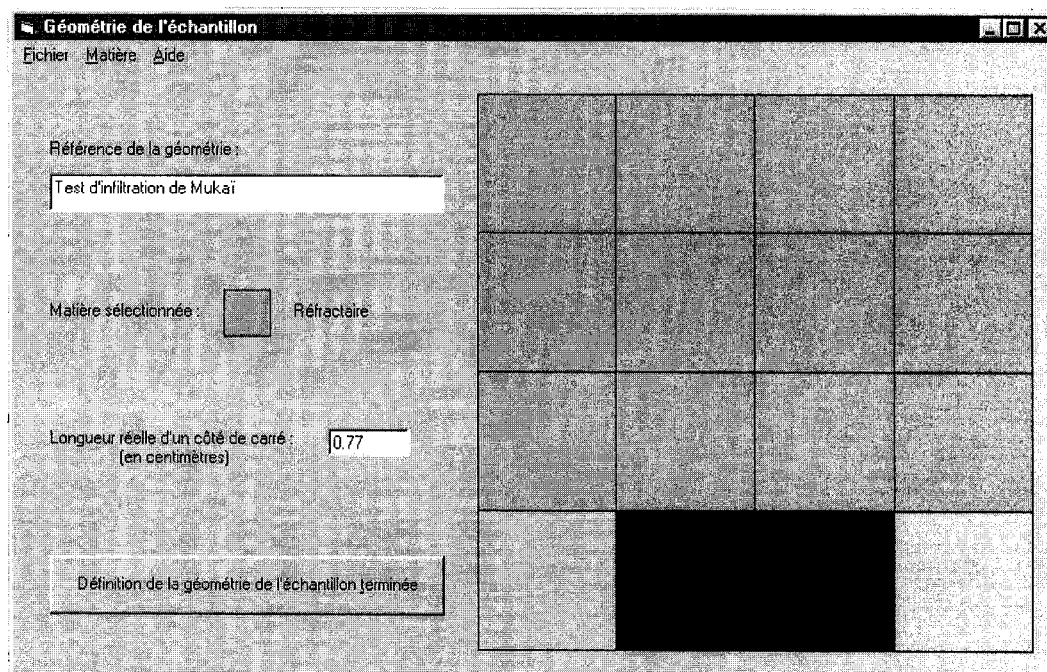


Figure 5.16 : Interface de définition de la géométrie de l'échantillon

☞ *définition des propriétés du liquide infiltrant et du réfractaire (figure 5.17)*

Les paramètres du système sont définis à la fois pour le liquide et le réfractaire, selon des propriétés microscopiques ou des paramètres caractéristiques (ou critères généraux). Le liquide est caractérisé par son angle de mouillage et sa tension superficielle (ou par K_c), par sa densité, par sa viscosité (ou par K_v). Le réfractaire est caractérisé par la taille de ses pores de deux façons différentes : par le diamètre maximal des pores (c'est le mode *Front d'infiltration*) ou par une distribution discrète de la taille des pores (c'est le mode *Concentration de métal*). La distribution de la taille des pores se définit par 10 catégories de diamètre différentes. Dans le mode *Concentration de métal*, bien évidemment, il n'est pas possible de caractériser le liquide par ses paramètres caractéristiques, eux-mêmes étant fonction de la taille des pores. Enfin, le réfractaire est aussi caractérisé par un facteur d'hétérogénéité ξ , qui va réduire la pression exercée sur le liquide pour une forte hétérogénéité. On reviendra plus tard sur ce facteur ξ .

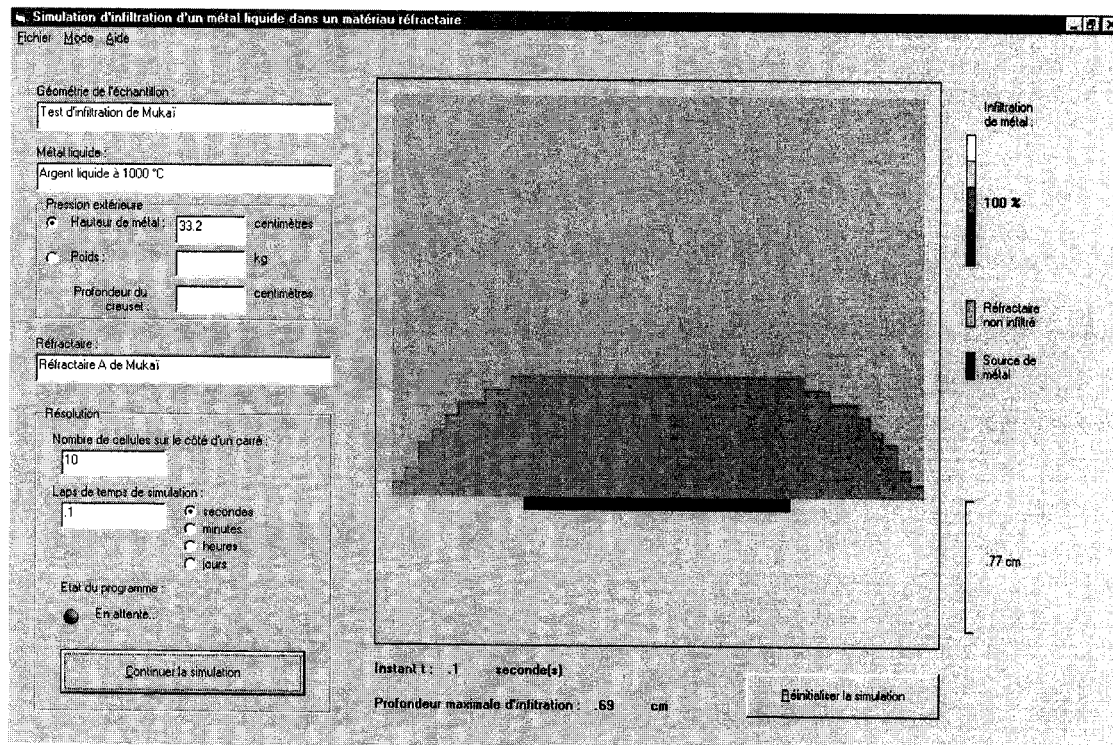


Figure 5.18 : Écran principal du programme

On peut noter que la pression externe exercée sur le liquide (ou pression métallostatique) est aussi définie à partir de l'écran principal. Elle est exprimée soit sous forme d'une hauteur de liquide, soit sous forme de poids.

visualisation de la cinétique d'infiltration

En cliquant sur le bouton « Commencer la simulation », on fait apparaître à l'écran principal l'échantillon (en vert) et la source de liquide (en bleu). En cliquant sur le même bouton (qui est devenu « Continuer la simulation »), le programme calcule l'évolution de l'infiltration selon les paramètres choisis ; on voit les cellules être infiltrées petit à petit (elles prennent alors la couleur rose). Au bout du laps de temps, le programme cesse les calculs et l'évolution de l'infiltration est figée. Le temps réel et la profondeur maximale d'infiltration sont affichés. En cliquant à nouveau sur le bouton, le programme reprend les calculs, là où il les avait laissés.

L'avantage principal du programme est donc d'offrir un modèle basé sur un réseau de capillaires. L'une des caractéristiques d'un tel réseau est la connectivité. En général, on considère que la connectivité représente la possibilité pour le liquide infiltrant de pouvoir utiliser dans son transport de multiples directions. Dans le modèle du capillaire simple, hors réseau, la connectivité est nulle : la seule direction possible est la direction de pénétration, c'est-à-dire la direction donnée par le capillaire. Deux représentations schématiques de la connectivité peuvent être imaginées (voir la figure 5.19). La représentation conventionnelle considère que la connectivité va se définir au niveau de chaque nœud du réseau : plus il y a de branches du réseau connecté au nœud, plus la connectivité est élevée. Une autre représentation, plus facilement adaptable à notre modèle, consiste à dire que la connectivité sera élevée si une branche du réseau, sur une certaine longueur, est connectée à un grand nombre d'autres branches.

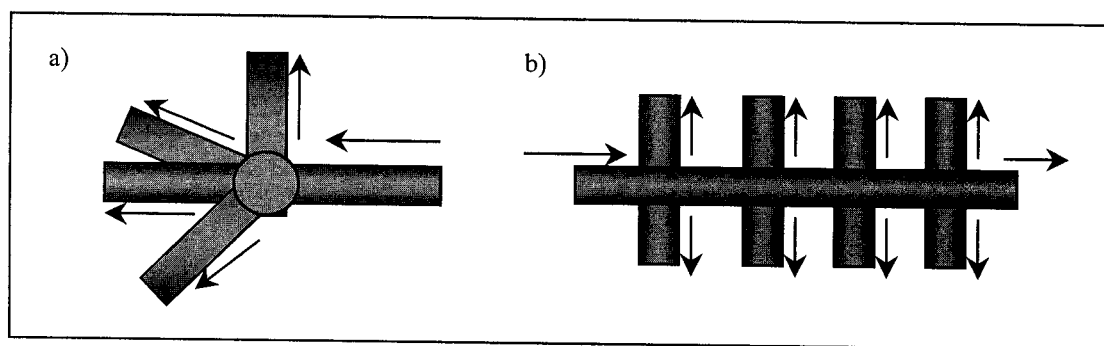


Figure 5.19 : Différentes représentations de la connectivité

La seconde représentation correspond en fait à la résolution spatiale définie dans le programme. Un grand nombre de cellules sur le côté d'une case va engendrer une grande connectivité du système. Il faut cependant distinguer la connectivité longitudinale (dans la direction d'infiltration) de la connectivité transversale (dans les directions latérales), qui n'ont pas le même effet sur la cinétique d'infiltration. Comme on l'a vu précédemment, la connectivité longitudinale a tendance à surestimer la cinétique d'infiltration, à cause du caractère non-linéaire de la cinétique d'infiltration. De toute façon, dans le but de rester assez proche du modèle du capillaire simple, l'effet

de la connectivité longitudinale sur le transport du liquide dans la direction d'infiltration a été inhibée dans le programme. Cependant, la connectivité longitudinale peut aussi sous-estimer la cinétique d'infiltration. En effet, le liquide infiltrant, au lieu de suivre simplement la direction d'infiltration, a tendance à s'« étaler » au sein de la structure poreuse, puisqu'il doit remplir aussi les capillaires transversaux du réseau. Il va donc mettre d'autant plus de temps à infiltrer le réseau qu'il existe de capillaires transversaux. La figure 5.20 représente ainsi l'effet de la connectivité sur la cinétique d'infiltration, en comparaison avec les données expérimentales.

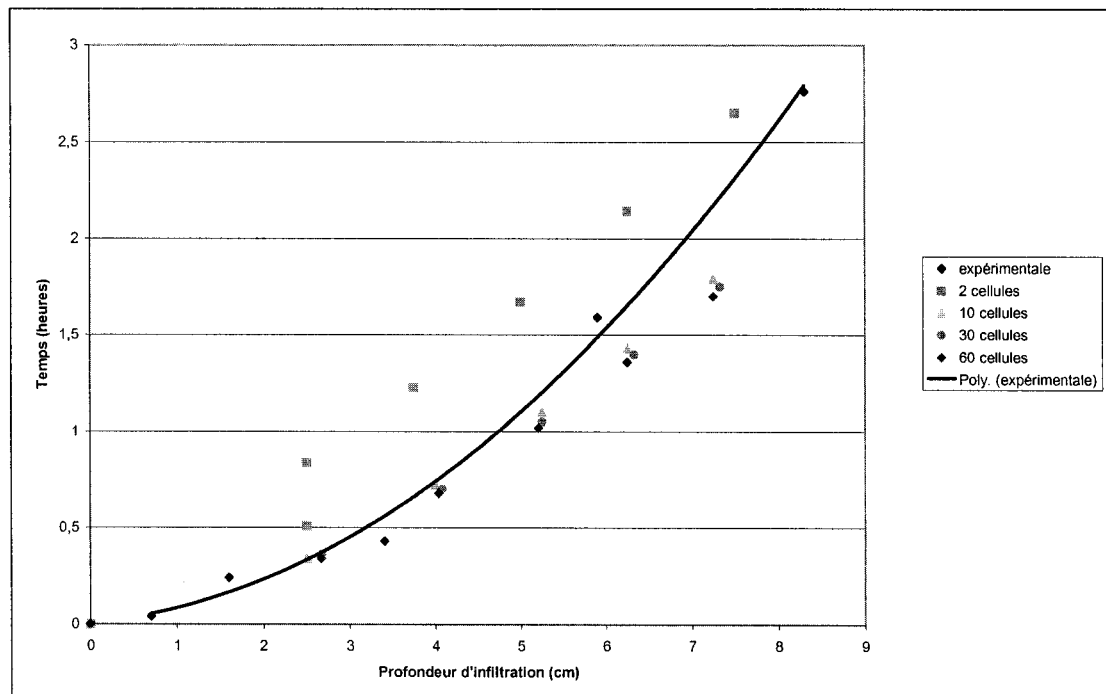


Figure 5.20 : Effet de la connectivité transversale sur la cinétique d'infiltration (en noir, données expérimentales issues de l'échantillon B-3)

Comme on s'y attend, la connectivité engendre une plus faible cinétique d'infiltration, mis à part dans le cas d'une résolution de 2 cellules par côté (toutefois, la cinétique a tendance à diminuer pour de plus grandes profondeurs d'infiltration). De plus, la cinétique est d'autant plus faible que la connectivité longitudinale est élevée, ce

qui s'explique par le fait que le nombre de capillaires transversaux à remplir augmente. Cet effet pourrait être contrôlé en introduisant un quotient de pondération (profondeur d'infiltration / largeur de l'échantillon x 2). D'autres résultats ont été trouvés en appliquant un lissage à chaque courbe de la figure 5.20 ; les paramètres caractéristiques sont rassemblés dans le tableau 5.6.

	$K_v (x10^{-18} \text{ m}^2/\text{Pa/s})$	$K_g (x10^9 \text{ kg/m}^2/\text{s})$	$K_{cp} (x10^6 \text{ Pa})$
expérimentale	820	3	260
2 cellules	710	8.9	44
10 cellules	830	6.4	210
30 cellules	820	6.3	240
60 cellules	870	5.8	240

Tableau 5.6 : Influence de la connectivité sur les paramètres caractéristiques

On constate que la valeur de K_v varie peu en fonction de la connectivité et que K_{cp} présente des valeurs légèrement inférieures à la valeur expérimentale. De même, K_g diminue lorsque la connectivité augmente, jusqu'à se rapprocher de la valeur expérimentale.

Le fait que les valeurs expérimentales des paramètres caractéristiques correspondent à une très grande connectivité peut facilement se comprendre : plus la connectivité transversale est élevée (grand nombre de branches longitudinales), plus rapide sera le remplissage des capillaires transversaux, et moindre sera la différence entre le modèle en réseau et le modèle du capillaire simple.

Finalement, on peut en conclure qu'une forte connectivité longitudinale rend la cinétique d'infiltration plus faible, alors qu'une forte connectivité transversale diminue la valeur de K_g . On a vu qu'une forte connectivité transversale rapproche le modèle en réseau du modèle du capillaire simple. Ceci signifie qu'un modèle fortement marqué par le réseautage développe une forte connectivité longitudinale et une faible connectivité

transversale, et donc est caractérisé par une plus faible cinétique d'infiltration et des valeurs de K_g élevées.

Cette affirmation est à rapprocher des valeurs expérimentales obtenues lors des essais d'infiltration (voir section 5.3). Les valeurs de K_g , en particulier, sont bien plus élevées que les valeurs calculées à partir des densités réelles des liquides. On peut se demander si ces valeurs très élevées ne correspondraient pas à autre chose que la densité du liquide. Ainsi, on pourrait penser que ces fortes valeurs sont dues à la mauvaise représentation de la structure poreuse des bétons par le modèle du capillaire simple. On sait que les capillaires de la structure poreuse sont en réalité interconnectés et forment donc un réseau. Donc on peut associer les valeurs expérimentales excessives de K_g à une forte connectivité de la structure poreuse. Encore une fois, la structure poreuse des bétons réfractaires ne doit pas être conçue comme un ensemble d'éléments séparés, mais plutôt comme un continuum.

L'autre grand avantage offert par le modèle en réseau est la prise en compte de la distribution en taille des pores. Le programme informatique, on l'a vu, peut aussi bien considérer une taille unique de pore (en général la taille maximale, afin de maximiser la cinétique d'infiltration), mais aussi une distribution discrète de taille de pores. La distribution se fait en 10 catégories de taille différentes, pondérées par la probabilité qu'elles ont d'exister dans la structure poreuse. La discrétisation de la distribution continue donnée par la porosimétrie au mercure se fait selon les besoins de l'utilisateur ; il se peut que l'utilisateur souhaite concentrer les catégories sur un intervalle précis (voir la figure 5.21).

Dès lors, chaque cellule va fonctionner comme une ensemble de 10 processeurs booléens, régissant l'infiltration de chaque catégorie de taille de pore. Bien évidemment, la catégorie des pores les plus gros va être la première à être remplie ; mais ceci ne signifie pas que la cellule est pleine, les autres catégories n'étant pas infiltrées. La

distribution en taille permet en effet de relativiser chaque catégorie au sein de la structure poreuse. La proportion du volume poreux infiltré dans chaque cellule est représenté par un certain pourcentage dans le programme (visualisé par un spectre de nuances roses). L'infiltration de chaque cellule se fait donc en 10 étapes.

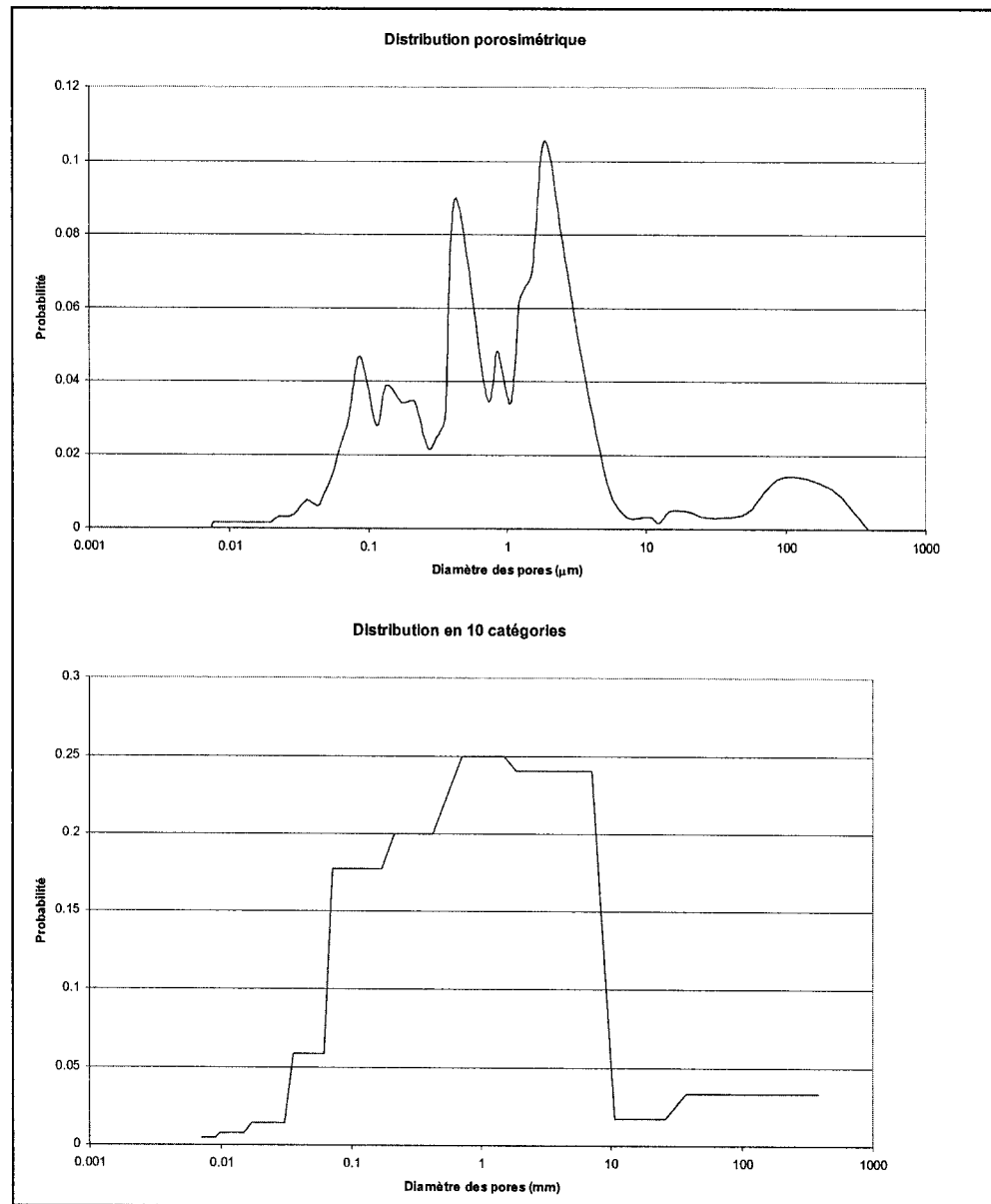


Figure 5.21 : Exemple de discrétisation de la distribution en taille des pores, pour le matériau A

Par ailleurs, le modèle en réseau permet d'interconnecter les différentes catégories de taille de pore. L'infiltration ne se fait pas de manière indépendante pour chaque catégorie, car il existe un couplage entre chaque cellule. Lorsqu'une cellule commence à être infiltrée (c'est-à-dire qu'une ou plusieurs catégories sont remplies), elle peut directement alimenter en liquide infiltrant toutes les catégories de taille de pore de l'une de ses voisines. Autrement dit, un gros pore infiltré peut aussi bien contribuer à l'infiltration d'un petit pore que d'un autre gros pore. Il se crée donc une arborescence dans l'infiltration de la structure poreuse. Ce phénomène représente bien mieux la réalité que le modèle du capillaire simple.

Un essai de simulation a été réalisé avec les données de l'argent liquide à 1000°C (qui a la propriété d'être non-réactif avec les bétons alumino-silicatés) et la structure poreuse du matériau A. Une forte pression externe (314 kPa) a été introduite dans le système, afin d'infiltrer le plus de catégories de pore possibles. On constate, durant la simulation (voir la figure 5.22), que seuls les pores les plus gros sont infiltrés dans un premier temps. Lorsque tout l'échantillon est touché par l'infiltration, seulement moins de 20 % de la structure poreuse est réellement infiltrée. Puis les pores plus petits sont à leur tour infiltrés, et entre 20 et 40 % de la structure poreuse est infiltrée. On peut voir sur la figure 5.22 que le profil d'infiltration adopté par les différentes catégories de taille de pore voit sa forme évoluer. Il s'agit probablement de la conséquence de l'arborescence de la structure poreuse, dont on a parlé précédemment.

Si l'on se place dans le cas de l'aluminium liquide, on peut se référer aux données à 800°C, sur substrat d'alumine (voir la section 2.2.2). Grâce à ces données, on trouve qu'un capillaire de diamètre 100 μm (ce qui correspond aux pores les plus gros d'un béton réfractaire) est infiltré par la pression métallostatique d'un bain d'au moins 32 cm de haut. Mais un capillaire de diamètre 10 μm (catégorie présente dans un béton réfractaire de manière plus importante) est infiltré par la pression métallostatique d'un bain d'au moins 3,2 m de haut. En général, la hauteur des bains d'aluminium liquide

dans les fours de traitement ne dépasse jamais 1 mètre. Ceci signifie que l'infiltration pure (en l'absence de réactions chimiques) d'un béton réfractaire par l'aluminium liquide ne se fait jamais massivement, mais uniquement par l'intermédiaire des pores les plus gros, occupant une partie mineure de la structure poreuse.

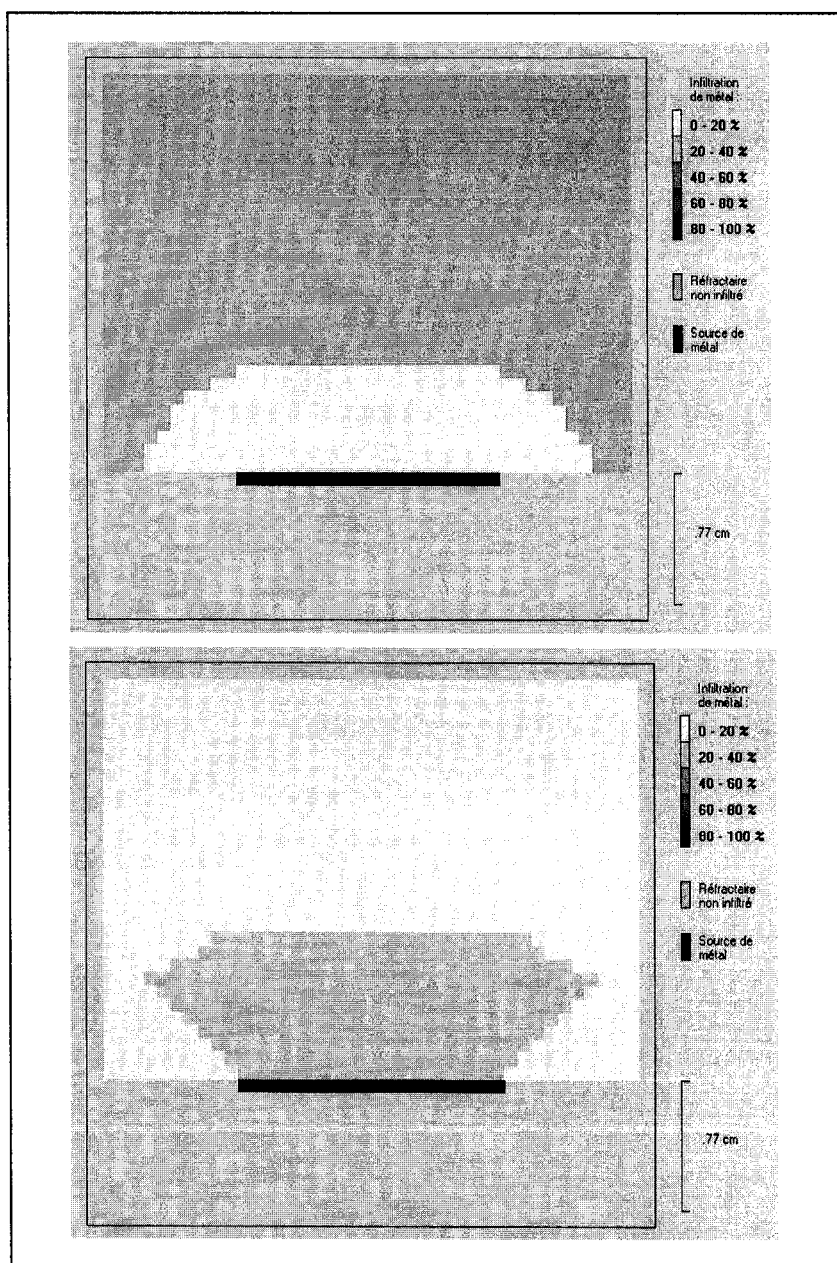


Figure 5.22 : Évolution de la forme du profil d'infiltration dans une structure poreuse soumise à une distribution de taille de pore

Cependant, la distribution en taille des pores demeure un aspect important de l'infiltration des bétons réfractaires par l'aluminium liquide. En effet :

- il existe toujours des microfissures de large diamètre d'ouverture dans les bétons (elles peuvent apparaître durant le service du revêtement réfractaire)
- les propriétés de mouillage du réfractaire peuvent être fortement modifiées par les réactions chimiques accompagnant l'infiltration
- la distribution en taille de pore permet de prendre en compte la porosité relative de la taille de pore
- la distribution en taille de pore montre, comme on l'a vu, montre différents profils d'infiltration selon la taille des pores

5.5. CONCLUSION DE LA SECTION 5

Les essais d'infiltration effectués dans le cadre de ce projet ont tous été faits à température ambiante, en utilisant une solution aqueuse de bleu de méthylène ou une huile de boîte de transmission. Ils ont été bidirectionnels (ascendants et descendants), afin de déterminer l'influence de la gravité. Ces essais ont très vite montré que l'hétérogénéité de la micro- et macrostructure des bétons réfractaires engendre deux effets nuisant à l'uniformité des résultats : l'effet d'échelle, dû à la texture des bétons, et l'effet de peau, provoquée par la ségrégation des fines particules en bordure des pièces coulées.

Les résultats ont été compilés sous forme de courbes représentant l'évolution de la profondeur d'infiltration en fonction du temps. Ces résultats ont ensuite été exploités par lissage de courbe, afin de modéliser la cinétique d'infiltration. Plusieurs équations ont été appliquées au lissage de courbe : équation quadratique, équation polynomiale du second degré et équation semi-logarithmique. L'équation quadratique, couramment utilisée en science de réfractaires, n'a pas semblée être la meilleure équation pour modéliser toutes les structures poreuses de béton. L'équation semi-logarithmique, qui semble être la plus adaptée, permet en plus de déterminer des paramètres

caractéristiques ayant un sens physique. Cependant, le paramètre K_v correspondant à la contribution de la viscosité donne des valeurs faibles, comme si on était en présence de capillaires très petits (de l'ordre du nanomètre). Ce paramètre semble respecter le rapport des viscosités entre les deux liquides. Le paramètre K_g , correspondant à la contribution de la gravité, reflète une action négligeable de la gravité et pourtant donne de fortes valeurs. À partir de K_v et des données expérimentales de la viscosité, on a calculé des rayons équivalents de pores. Ces rayons équivalents semblent inversement proportionnels à la racine carrée de la surface totale poreuse des matériaux. Enfin, la cinétique d'infiltration semble être sensible aux différences de viscosité des liquides infiltrants...

Dans une deuxième phase du projet, un programme informatique a été développé afin de simuler l'évolution de l'infiltration à partir des données choisies. Ce programme, basé sur le principe de l'automate cellulaire, a permis d'améliorer davantage le modèle semi-logarithmique en introduisant un réseau de capillaires et une distribution en taille de pore. Le réseau de capillaires entraîne l'apparition d'un nouveau facteur : la connectivité. La connectivité a pour effet principal d'augmenter les valeurs du paramètre K_g et de ralentir la cinétique d'infiltration. Une analogie a été faite entre la connectivité et la tortuosité. Quant à la distribution en taille des pores, elle montre une grande différence entre les cinétiques d'infiltration selon la taille des pores ; les pores les plus gros vont provoquer une infiltration plus rapide, mais sur un faible volume de la porosité.

6. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

On conclura ce mémoire par une discussion à propos de la validité du modèle de cinétique d'infiltration proposé, des perspectives concernant des recherches futures liées à ce thème et une brève conclusion finale.

6.1. DISCUSSION

Que penser de l'envergure et de l'importance relatives au modèle développé dans le cadre de ce projet ?

Il faut probablement se replacer dans le contexte de la modélisation scientifique pour en tirer une quelconque critique. Box ⁽⁸⁾ disait : « Aucun modèle ne peut donner une description précise de ce qui se passe. Un modèle théorique valide, pourtant, fournit des informations sur le système étudié, pour des intervalles importants de variables, au moyen d'équations reflétant au moins les caractéristiques majeures du mécanisme. » Cette citation s'applique tout à fait à ce projet. Le problème de la modélisation, dans le cas des matériaux réfractaires, est délicat à cause de la nature très hétérogène de la microstructure, aussi bien dans le cas des propriétés thermomécaniques, des propriétés chimiques que pour la cinétique d'infiltration. Cette hétérogénéité constitue une limite à la modélisation, car elle rend les propriétés très diffuses au niveau de la microstructure.

On fait quand même appel aux propriétés macrostructurelles afin de caractériser les matériaux réfractaires... Mais l'explication des propriétés macrostructurelles se trouve souvent dans la microstructure-même. L'objectif de ce projet n'était pas tant de déterminer une loi universelle régissant la cinétique d'infiltration, que de justement trouver les paramètres influant sur la cinétique d'infiltration, de mieux comprendre le phénomène d'infiltration et de maîtriser les tendances concernant la cinétique d'infiltration.

Dans ce cadre de recherche, on a voulu toucher aux limites que constitue l'hétérogénéité structurelle des réfractaires. Comment s'est manifestée l'hétérogénéité dans le modèle développé ? De deux façons :

- La taille des capillaires calculée avec le modèle s'est révélée être inférieure à la taille réelle des pores. Or les formes complexes que revêtent les capillaires dans la réalité (tortuosité, rugosité des parois, variation de section, etc.) ont pour effet de ralentir la cinétique d'infiltration. Il semblerait que la modélisation développée dans ce programme rende compte de ce « ralentissement » par des tailles équivalentes de capillaire plus petite que dans la réalité.
- Des valeurs surélevés du paramètre K_g peuvent traduire une plus grande connectivité du réseau. C'est un résultat très intéressant, car il permet de corréler directement une forme d'hétérogénéité dans la structure poreuse à une grandeur physique. Une plus grande connectivité va produire un « étalement » du liquide infiltrant au sein de la structure poreuse. En réalité, c'est ce principe d'étalement qui permet de faire une analogie entre la connectivité d'un réseau théorique et la tortuosité des pores (voir la figure 6.1). La tortuosité, comme on l'a déjà dit, caractérise la longueur réelle d'un capillaire par rapport à la longueur théorique (c'est-à-dire la longueur la plus courte possible). Cette définition de la tortuosité demeure une représentation idéale de la structure poreuse, puisque elle considère la structure poreuse comme un ensemble de pores séparés les uns des autres. On peut considérer aussi que la tortuosité est un facteur permettant de rendre compte que le liquide infiltrant va « s'égarer » dans la structure poreuse entre les points d'entrée et de sortie théoriques, autrement dit le liquide va s'étaler dans la structure. Ce qui est assez étonnant, c'est que la force motrice contribuant à l'étalement du liquide dans la structure poreuse est assimilable à une force gravitationnelle de sens inverse à la direction de pénétration.

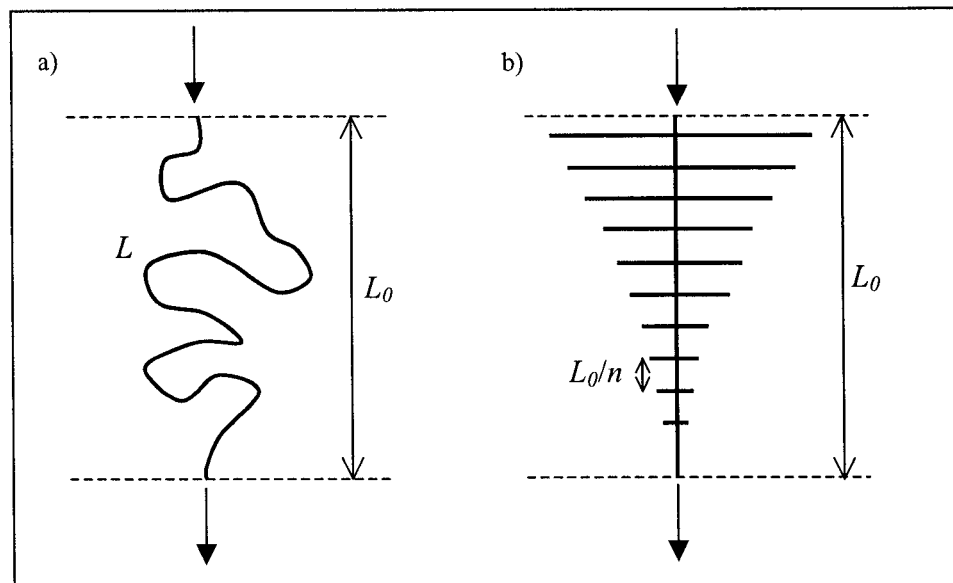


Figure 6.1 : Deux représentations possibles pour l'« étalement » du liquide infiltrant dans la structure poreuse : a) par la tortuosité $\tau = L/L_0$, b) par la connectivité $n(L_0)$ du réseau

Les valeurs élevées du paramètre K_{cp} issues du lissage de courbe s'expliquent plus difficilement, malgré les faibles valeurs calculées pour les rayons équivalents. Une possibilité d'explication pourrait venir d'une surestimation de la tension superficielle du liquide infiltrant. En effet, le réseautage du modèle donne lieu, comme on l'a vu en section 5.4, à un continuum poreux constitué de capillaires interconnectés. L'angle de mouillage est censé demeurer similaire pour chaque capillaire, mais la tension superficielle, si elle est considérée à l'échelle du continuum, devrait être bien supérieure à la tension superficielle développée pour un capillaire simple. L'interface liquide – gaz à l'intérieur de la structure poreuse infiltrée est bien plus importante que dans un simple capillaire...

Zushu Li et al. ⁽⁴²⁾ ont travaillé avec un modèle de capillaire simple pour caractériser l'infiltration de réfractaires alumino-silicatés par de l'argent liquide (qui présente l'avantage d'être un liquide non-réactif pour ce système). L'hétérogénéité de la

structure poreuse a été modélisée, dans leurs travaux, par un « facteur labyrinthique » ξ accolé au paramètre K_{cp} . Ce facteur a pour but de rendre compte de l'hétérogénéité en réduisant la valeur de la pression exercée sur le fluide infiltrant. Il est défini par l'équation suivante :

$$\xi = 0.04 + 0.238\varepsilon \quad (6.1)$$

où ε est la porosité ouverte du réfractaire.

Cette équation empirique est en partie contrôlée par la porosité du réfractaire. Ceci signifie que plus le réfractaire est poreux, plus faible sera l'hétérogénéité de la structure poreuse, et plus facile sera l'infiltration. Autrement dit : plus le volume alloué à une catégorie de taille de pore donnée au sein de la structure poreuse est faible, plus complexe sera la forme revêtue par les pores, due probablement à une forte interconnectivité. Il est certain qu'un réseau de pores de grand volume, par rapport à l'ensemble du matériau, a plus de chance de posséder une grande connectivité. Mais il est plus difficile de savoir quel type de connectivité va intervenir principalement : soit la connectivité longitudinale, qui va ralentir la cinétique d'infiltration, soit la connectivité transversale, qui va accélérer la cinétique d'infiltration (voir la figure 6.2).

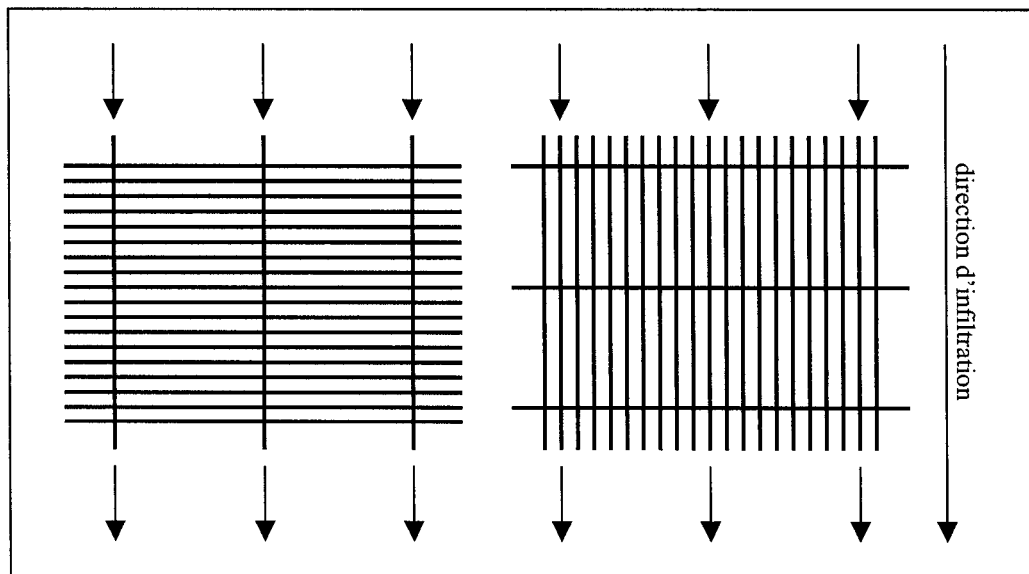


Figure 6.2 : Représentation des deux types de connectivité : à gauche, forte connectivité longitudinale, et à droite, forte connectivité transversale

En réalité, les deux connectivités sont des paramètres très relatifs l'un par rapport à l'autre : les deux types de connectivité ayant des effets contraires sur la cinétique d'infiltration, il faudrait toujours prendre en compte les deux à la fois. Si l'on veut se rapprocher du modèle du capillaire simple, il faudrait choisir une faible connectivité longitudinale et une forte connectivité transversale. À l'inverse, si l'on veut représenter un étalement important du liquide infiltrant dans la structure poreuse, il faudrait choisir une forte connectivité longitudinale et une faible connectivité transversale.

Finalement, la modélisation de la cinétique d'infiltration dans un milieu poreux se ramène à la modélisation de la structure poreuse. Habituellement, en science des réfractaires, on simplifie à outrance la structure poreuse pour la représenter par un simple capillaire. On a vu que cette représentation n'était pas toujours suffisamment fidèle à la réalité, à l'échelle des problèmes d'infiltration des réfractaires. Le réseautage en cellules carrées (ou rectangulaires) a permis d'obtenir une représentation plus fidèle, en restant relativement simple.

Si l'on se réfère au travail de Boutin et al. ⁽⁷⁾, une analyse d'image par ordinateur a été effectuée sur la structure poreuse d'un réfractaire à base de carbure de silicium et de briques d'alumine. Elle a montré que le carbure de silicium présentait de grands pores intergranulaires interconnectés par un grand nombre de petits pores (assimilables à des capillaires), alors que l'alumine contenait de plus grands pores ouverts en canaux et interconnectés autour de grains d'alumine « spongieux » comportant un grand nombre de petits pores sphériques fermés (voir la figure 6.3). Ces résultats ont été corrélés avec des essais de corrosion par le laitier, qui ont montré une forte infiltration dans la cas de la brique d'alumine et une infiltration quasiment inexistante pour le carbure de silicium.

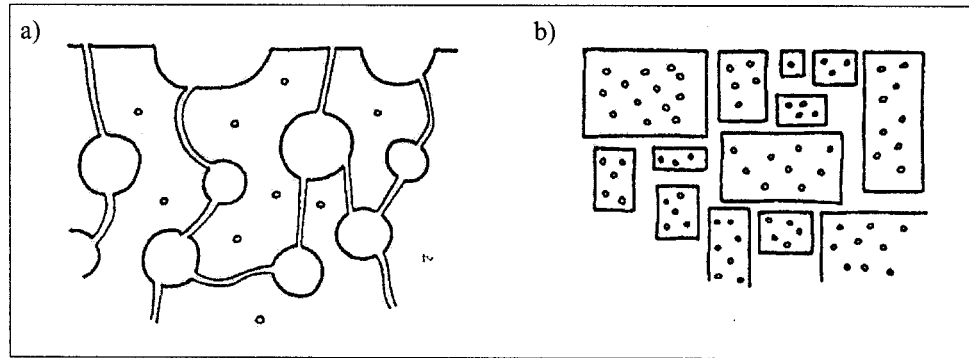


Figure 6.3 : Structure poreuses schématisées d'un réfractaire à base de carbure de silicium (a) et d'un réfractaire alumineux (b), selon Boutin ⁽⁷⁾

Peut-on modéliser ces configurations de structure poreuse avec le modèle qui a été développé au cours de ce projet ? Si l'on regarde de plus près, la configuration pour le carbure de silicium comporte un réseau de capillaires de petite taille, assez peu connectés (donc assez proches du modèle du capillaire simple). Seuls les gros pores intergranulaires sont plus délicats à être représentés, car ils ne participent pas vraiment au transport du liquide. On peut donc difficilement les modéliser par une simple distribution en taille de pore. En fait, ces gros pores participent davantage à l'étalement du liquide dans la structure poreuse. Ils seraient donc mieux représentés par une « connectivité longitudinale » plus importante. Dans le cas de la brique d'alumine, les petits pores sphériques dans les grains sont fermés et n'interviennent pas dans le transport du liquide. Les capillaires plus gros peuvent, au contraire, être représentés facilement par un réseau de connectivité et de distribution en taille adéquates. La distribution en taille va être d'autant plus importante qu'elle est étroite (faible diffusion des tailles de pores).

Une modélisation très sophistiquée des structures poreuses a été développée à l'Université de Plymouth (Grande-Bretagne), par le groupe de recherche sur les interactions de fluides. Ce groupe de recherche a produit un logiciel beaucoup plus puissant que le programme de simulation développé pour ce projet. Le logiciel, appelé

Pore-Cor, permet d'étudier les propriétés des structures poreuses pour des tailles de pores de plus de 2 nm. La modélisation est aussi basée sur un réseau, mais fait intervenir un ensemble de cylindres et de cubes de tailles très diverses. Cette double géométrie permet de représenter facilement les variations de section des pores. Un exemple de schématisation de la structure poreuse conçue par ce logiciel est donné dans la figure 6.4.

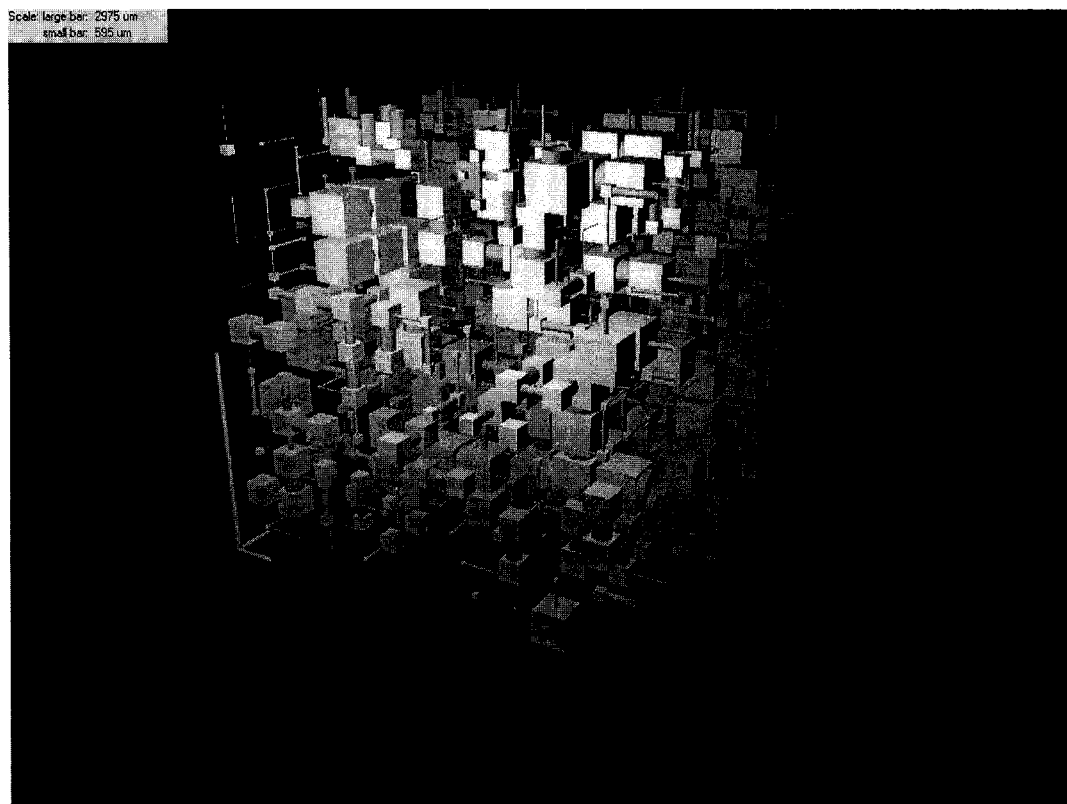


Figure 6.4 : Modélisation de la structure poreuse, offerte par le logiciel *Pore-Cor*, dans le cas de sol compacté

On doit cependant noter que ce type de modélisation requiert une connaissance intime de la structure poreuse. Pour des matériaux tels que de la terre, du grès ou des papiers à revêtements spéciaux (qui sont des exemples donnés par le producteur du logiciel), la structure poreuse est plus facile à caractériser, les grains constituant le

matériau étant de taille et de nature plus homogènes. Dans le cas des réfractaires, il est difficile d'obtenir cette précision. En effet, on a vu que la microstructure des réfractaires était très hétérogène à l'échelle des essais de corrosion. Il est donc nécessaire de prendre un certain recul par rapport à la description exhaustive de la structure poreuse, et de donner un sens statistique à la modélisation...

6.2. PERSPECTIVES

Ce projet d'étude de la cinétique d'infiltration dans les matériaux réfractaires est vaste et le travail qui a été fait ici ne constitue qu'une petite partie d'une plus grande entreprise. Maintes possibilités s'offrent au monde de la recherche pour continuer d'étudier sur le thème de l'infiltration des matériaux réfractaires...

Comme on l'a vu, la modélisation de la cinétique demande une meilleure connaissance de la structure poreuse. Un travail de caractérisation pourrait être fait en ce sens à l'aide de l'analyse d'image par ordinateur. Les observations microscopiques de la structure poreuse peuvent être ainsi traitées par ordinateur afin d'en tirer des données statistiques, comme Boutin et al. ⁽⁷⁾ l'ont fait en utilisant la fonction $P(l)$. La forme complexe que revêt la structure poreuse laisse à penser que la caractérisation par les techniques fractales est aussi possible. Les propriétés géométriques des structures irrégulières, comme celle des pores de réfractaires, ne peuvent être décrites que de manière simplifiée au moyen de la géométrie euclidienne (c'est-à-dire la géométrie classique). À l'aide de la géométrie fractale, des « régularités » peuvent être déterminées à partir des irrégularités dont font preuve la plupart des structures naturelles. Ceci devient évident en caractérisant géométriquement des structures à différentes échelles ; une simple corrélation mathématique apparaît entre l'échelle et la valeur mesurée. Des mesures encore plus précises à une échelle encore plus petite conduit à des valeurs toujours plus élevées. Cette corrélation est donnée par l'équation suivante :

$$X(\varepsilon) = X(\varepsilon = 1) \varepsilon^{\text{ED-FD}} \quad (6.2)$$

Lorsque la dimension euclidienne ED est connue, la dimension fractale FD peut alors être déterminée graphiquement ou au moyen de la pente de la représentation doublement logarithmique de la valeur mesurée X en fonction de l'échelle ε . La dimension fractale caractérise le degré de dépendance à la résolution qui, en termes visuels, représente en général l'irrégularité d'une propriété. En caractérisant géométriquement une structure poreuse, une augmentation dans la résolution révélera des cavités toujours plus petites. Le volume poreux, aussi bien que la surface poreuse, peut posséder des propriétés fractales. Une dépendance à la résolution (ou à l'échelle) des valeurs mesurées et une configuration ou une forme irrégulière donnent des indications claires à ce sujet. À l'aide de la géométrie fractale, la quantification du degré de dépendance à la résolution peut fournir des paramètres supplémentaires, qui peuvent être très utiles pour les problèmes de transport de fluide.

On ne développera pas plus ici la théorie des fractals, mais le lecteur intéressé peut se reporter à l'ouvrage d'Avnir ⁽⁵⁾ qui expose les applications possibles de la géométrie fractale à la chimie et à la science des matériaux. Concernant l'étude des structures poreuses, on peut se référer à l'excellent article de Meng ⁽²⁷⁾ et à celui d'Adler ⁽¹⁾, plus théorique. Si l'application des fractals à l'étude des structures poreuses est récente, elle est seulement émergente dans le cas des réfractaires : très peu d'articles existent à ce sujet ^(17, 39).

L'aspect expérimental de l'étude de la cinétique d'infiltration peut être aussi développé. L'observation de l'infiltration d'un métal liquide dans un réfractaire est une tâche peu évidente. Cependant, on pourrait utiliser un dispositif d'observation à rayons X, comme celui proposé par Zushu ⁽⁴²⁾, qui permettrait de caractériser en temps réel l'évolution de l'infiltration. Ce dispositif présente l'avantage d'éviter les chocs thermiques (pour sortir l'échantillon du four) et d'améliorer la précision des résultats (on connaît la profondeur d'infiltration à l'instant donné). Dans le cas de l'aluminium liquide, l'étude de l'infiltration dans les bétons alumino-silicatés est souvent couplée

avec des réactions chimiques. Il est certain que la réduction de la silice et la formation de corindon vont modifier substantiellement la structure poreuse, mais aussi changer les propriétés de l'aluminium liquide. Il pourrait être intéressant d'étudier l'influence respective de l'oxydation directe de l'aluminium et de l'oxydo-réduction du réfractaire sur la cinétique d'infiltration, en faisant varier la teneur en oxygène de l'atmosphère.

Même en l'absence de réactions chimiques, des phénomènes physiques peuvent venir perturber la cinétique d'infiltration. Ainsi, une pression partielle d'oxygène élevée diminue la tension de surface de l'aluminium fondu, ce qui rend l'aluminium plus mouillant. Donc un gradient de pression partielle d'oxygène doit produire un gradient de tension de surface du métal liquide. On peut donc imaginer qu'il se développe un phénomène d'interface, appelé effet Marangoni. L'effet Marangoni porte le nom du physicien italien qui découvrit dès 1871 les effets entraînant des gradients de surface ⁽¹⁶⁾. Cet effet apparaît dans un verre contenant du vin fort en alcool : l'évaporation de l'alcool sur les bords du verre forme de petites gouttelettes. Il a été aussi étudié en métallurgie ; de nombreux mécanismes ont été proposés pour les procédés sidérurgiques ^(29, 30), mais peu d'articles en parlent dans le cas de l'aluminium ^(35, 40). Ainsi, un gradient de température T , un gradient de concentration C de l'élément actif à la surface du liquide ou un gradient de potentiel électrique ψ entraîne un gradient de tension de surface, créant à son tour une force de cisaillement dans la direction x :

$$\tau_s = \frac{d\sigma}{dx} = \frac{\partial\sigma}{\partial T} \frac{dT}{dx} + \frac{\partial\sigma}{\partial C} \frac{dC}{dx} + \frac{\partial\sigma}{\partial\psi} \frac{d\psi}{dx} \quad (6.3)$$

Cette force de cisaillement sera donc d'autant plus élevée que le gradient thermique, le gradient de concentration ou le gradient de potentiel électrique est grand et que la tension de surface du matériau est sensible à la température, à la concentration et au potentiel électrique. Dans le cas d'un four de traitement de l'aluminium liquide, il n'y a, bien sûr, pas de gradient de potentiel électrique. Il existe cependant un fort gradient de température entre la face chaude du réfractaire et sa face froide (plusieurs centaines de degrés). Un autre gradient de température, plus faible, apparaît à l'interface

métal/réfractaire, près de la ligne de métal. Ce second gradient de température est accompagné d'un gradient de concentration en oxygène (figure 6.5).

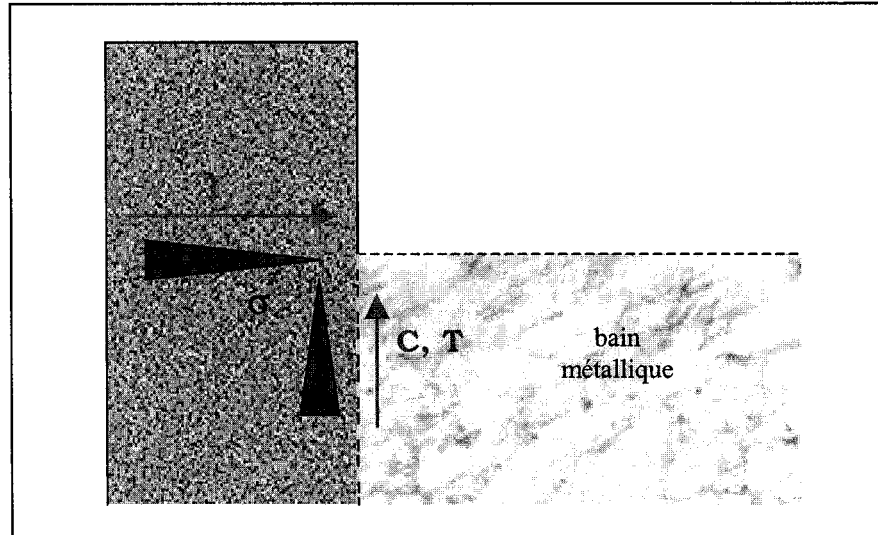


Figure 6.5 : Représentation des gradients de température et de concentration à l'interface réfractaire – aluminium liquide

Ces gradients vont produire des gradients de tension de surface :

- la tension de surface va s'accroître de la surface supérieure du bain métallique vers l'intérieur du réfractaire (écart approximatif de 300 à 400 mJ/m²)
- elle va aussi s'accroître de la ligne de métal vers le fond du bain sur une courte distance, à l'interface métal/réfractaire (écart approximatif de 200 mJ/m² pour le gradient de température, et de 220 mJ/m² pour le gradient de concentration).

La force de cisaillement créée par le gradient de tension de surface provoque un mouvement de convection à la surface considérée ⁽¹⁶⁾. Le fluide aura tendance à se déplacer des faibles tensions de surface vers les fortes tensions de surface. Ainsi, d'après les hypothèses qui ont été faites précédemment, on peut imaginer qu'il peut se produire des convections dues à l'effet Marangoni à l'interface triple réfractaire – métal liquide – atmosphère. De plus, on sait que la structure poreuse des réfractaires présente

une très grande surface au liquide infiltrant, ce qui pourrait renforcer un effet d'interface, tel que l'effet Marangoni.

Voilà donc quelques éléments qui pourraient servir de points de départ pour une étude plus exhaustive de la cinétique d'infiltration dans les réfractaires. Comme on peut le voir, le champ de recherche est vaste...

6.3. CONCLUSION FINALE

Ce projet visait à mieux comprendre les paramètres régissant l'infiltration d'un liquide dans la porosité d'un béton réfractaire, en tentant détablir un modèle pour la cinétique d'infiltration.

La première partie du projet a consisté à caractériser la structure poreuse des bétons par analyse de la composition chimique, étude de la distribution granulométrique du mélange de grains, analyse des courbes dilatométriques lors de la cuisson, mesures de la porosité et de la densité, porosimétrie par intrusion de mercure, et observations microscopiques. On en a conclu que :

- la porosité est contrôlée par la quantité de ciment, la présence de défloculant et la distribution granulométrique
- la cuisson jusqu'à 1000°C induit peu de densification, mise à part celle due à la fumée de silice
- la structure poreuse relève de trois types de porosités : les bulles de coulage, la porosité intergranulaire autour des agrégats et la porosité matricielle constituée de capillaires dans la matrice

La deuxième partie est composée des essais d'infiltration. Tous les essais se sont fait à température ambiante, à l'aide de liquides non-réactifs, l'objectif étant d'étudier la cinétique d'infiltration en l'absence de réactions chimiques et en l'absence de gradients thermiques. Les liquides choisis étaient une solution aqueuse de bleu de méthylène et de

l'huile colorée en rouge. Les essais étaient bidirectionnels, à la fois ascendants et descendants. L'exploitation des résultats s'est faite par lissage de courbe non-linéaire. La loi semi-logarithmique proposée s'est révélée être meilleure que la simple loi quadratique pour modéliser au mieux l'infiltration d'un liquide non-réactif dans la structure poreuse d'un béton réfractaire. Le lissage de courbe a permis de déterminer des paramètres caractéristiques pour la cinétique d'infiltration. On a déduit de ces résultats que :

- la modélisation est limitée par le caractère hétérogène de la microstructure du béton (c'est l'effet d'échelle)
- même si la cinétique d'infiltration est principalement contrôlée par la matrice du béton, elle est influencée par la présence des agrégats
- l'effet de peau peut jouer un rôle protecteur pour le réfractaire si la distribution granulométrique et la teneur en ciment sont adéquatement choisis
- le lissage de courbe implique des tailles équivalentes de pores très petites, reflétant probablement une certaine hétérogénéité de la structure poreuse
- la gravité semble avoir un effet négligeable sur la cinétique d'infiltration, alors la viscosité du liquide infiltrant exerce une grande influence

La troisième partie du projet a permis l'amélioration du modèle en introduisant le réseautage. Dans le modèle proposé, la structure poreuse n'est plus représentée par un ensemble d'éléments séparés, mais par un continuum statistique. Le réseau est géré par un certain degré de connectivité et par une distribution en taille de pore. Un programme informatique a été développé pour simuler le fonctionnement de ce nouveau modèle, en étant basé sur un automate cellulaire semi-stochastique à deux dimensions. Les essais ont montré que :

- la connectivité agit comme la tortuosité au sein de la structure poreuse, en étalant le liquide infiltrant
- l'arborescence dans la structure poreuse représente mieux la réalité

- la distribution en taille de pore n'a d'effet sensible que pour une distribution relativement étroite

Ce modèle présente l'avantage de fournir des paramètres physiques et une représentation plus réaliste que la loi quadratique, tout en respectant le « recul statistique » nécessaire à l'hétérogénéité de la microstructure des réfractaires.

7. RÉFÉRENCES

- (1) ADLER P.M. (1985), Transport Processes in Fractals, International Journal of Multiphase Flow, 11, 1, 91-108 et 11, 2, 213-239, 241-254
- (2) ALLAHVERDI M., ALLAIRE C. et AFSHAR S. (1997), Effect of BaSO₄, CaF₂, and AlF₃ as well as Na₂O on aluminosilicates having a mullite-like composition, Journal of the Canadian Ceramic Society, 66, 3, 223-230
- (3) ALLAIRE C. (2000), Mechanisms of corundum growth in refractories exposed to Al-Mg alloys, Aluminum Transactions, 3, 1, 105-120
- (4) ALLAIRE C. (2000), Refractories for Molten Aluminum Confinement, Journal of the Canadian Ceramic Society, 69, 1, 14-21
- (5) AVNIR D. (1989), The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry, John Wiley Editor, Toronto
- (6) BENTSON J.T. et al (1989), Refractories : their production and use, American Ceramic Society, Continuous Educ. Comise
- (7) BOUTIN J. et al. (1988), The Modeling of Pores Substructures of Refractories by Computer Image Analysis, Proceedings of the Metallurgical Society of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Édité par M.A. Rigaud, Pergamon Press, New-York
- (8) BOX G.E.P. & HUNTER W.G. (1962), A Useful Method for Model-Building, Technometrics, 4, 3, 301-307
- (9) BRONDYKE K.L. (1953), Effect of molten aluminum on alumina-silica-refractories, Journal of the American Ceramic Society, 36, 5, 171-177
- (10) CARNIGLIA S.C. & BARNA G.L. (1992), Handbook of Industrial Refractories Technology, Noyes Publications, New Jersey, USA
- (11) DELANNAY F. et al. (1987), The wetting of solids by molten metals and its relation to the preparation of metal-matrix composites (Review), Journal of Materials Science, 22, 1, 1-16

- (12) DEPUSSAY B. (1994), Rôle de l'oxydo-réduction dans la corrosion des réfractaires par l'aluminium et ses alliages, Thèse présentée à l'Ecole Supérieure de l'Energie et des Matériaux, Université d'Orléans, France
- (13) DROUZY M. & RICHARD M. (1974), Oxydation des alliages d'aluminium fondus, Fonderie, 332, 3, 121-128
- (14) GABIS V. (1994), Comportements des réfractaires au contact de l'aluminium et de ses alliages, Fonderie, Fondateurs d'Aujourd'hui, n°131, 29-42
- (15) GASKELL D.R. (1992), An Introduction to Transport Phenomena in Materials Engineering, Mac Millan Publishing Company, New-York
- (16) HAMMERSCHMIDT P. (1987), Bedeutung des Marangoni-Effekts für metallurgische Vorgänge, Stahl und Eisen, 107, 2, 25-36
- (17) HONGJIE W. et al. (2001), Fractal Geometry – A new method of microstructure research on refractories, UNITECR'01, Cancun, vol.3
- (18) INNOCENTINI M.D.M. et al. (1999), How accurate is Darcy's law for refractories, American Ceramic Society Bulletin, 78, 11, 64-68
- (19) INNOCENTINI M.D.M. & PANDOLFELLI V.C. (2001), Permeability for Porous Ceramics Considering the Klinkenberg and Inertial Effects, Journal of the American Ceramic Society, 84, 5, 941-944
- (20) INNOCENTINI M.D.M. et al. (2001), How PSD Affects Permeability of Castables, American Ceramic Society Bulletin, 80, 5, 31-36
- (21) INNOCENTINI M.D.M. et al. (2001), Permeability of Refractory Castables at High Temperatures, Journal of the American Ceramic Society, 84, 3, 645-647
- (22) JACQUOT F. (1998), Contribution expérimentale et théorique à une nouvelle approche de la mouillabilité, Thèse présentée à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, France
- (23) KLOUBEK J. (1981), Hysteresis in Porosimetry, Powder Technology, 29, 1-12

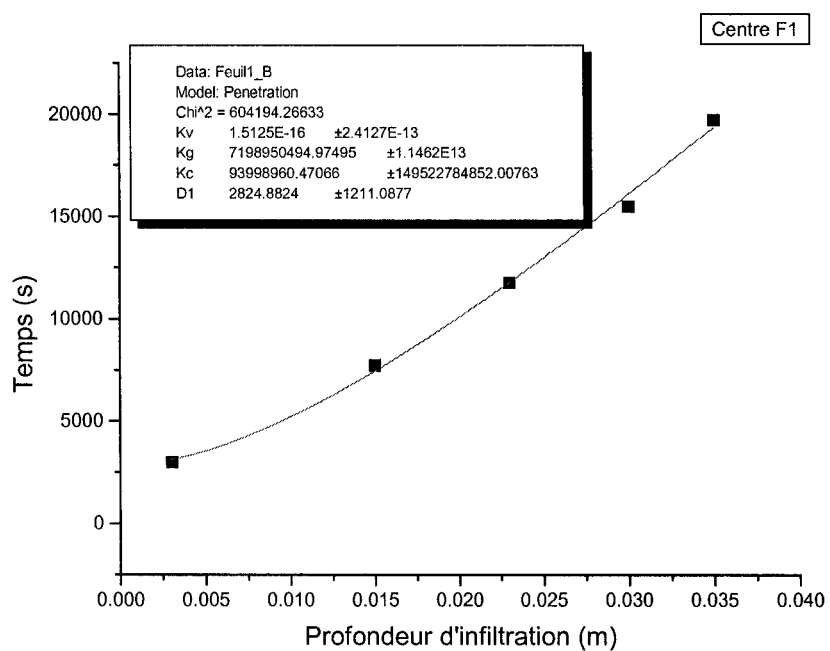
- (24) LEVI G. & KAPLAN W.D. (2002), Iron as Oxygen Tracer at the Aluminum-Alumina Interface, Journal of the American Ceramic Society, 85, 6, 1601-1606
- (25) LINDSAY J.G. et al. (1964), Chemical Resistance of refractories to Al and Al-Mg-alloys, Journal of the American Ceramic Society, 47, 2, 90-94
- (26) MEUNIER P. (2001), Rapport interne à la chaire REFRAL : Structure poreuse des bétons réfractaires et cinétique de pénétration
- (27) MENG B. (1996), Determination and Interpretation of Fractal Properties of the Sandstone Pore System, Materials and Structures, 29, mai 1996, 195-205
- (28) MONDOLFO L.F. (1976), Aluminum Alloys : Structure and Properties, Butterworths Publishers, London – Boston
- (29) MUKAI K. et al. (1986), Corrosion of Alumina-Graphite Refractories at the Slag-Metal Interface, Canadian Metallurgical Quarterly, 25, 4, 265-275
- (30) MUKAI K. & WANG Z. (2000), Interfacial Phenomena of High Temperature Melts in relation to Materials Processing, J.M. Toguri Symposium, Fundamentals of Metallurgical Processing, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum
- (31) OGINO K. (1982), Measurements of Wettability of Refractory by Molten Metal, Taikabatsu Overseas, 2, 2, 15-20
- (32) PANDOLFELLI V.C. et al. (1999), Permeability of High-Alumina Self-Flow Refractory Castables, UNITECR'99 Proceedings, Edited by J. Kramss, German Refractory Association, Berlin
- (33) PRABRIPULALOONG K. & PIGOTT M.R. (1973), Thin-film studies of the reduction of SiO₂ by Al, Reduction of SiO₂ by molten Al, Journal of the American Ceramic Society, 56, 177-180, 184-185
- (34) RIGAUD M. (2000), Corrosion of Refractories and Ceramics, Uhlig's Corrosion Handbook, Second Edition, Edited by R. Winston Revie, John Wiley & Sons, 395-410

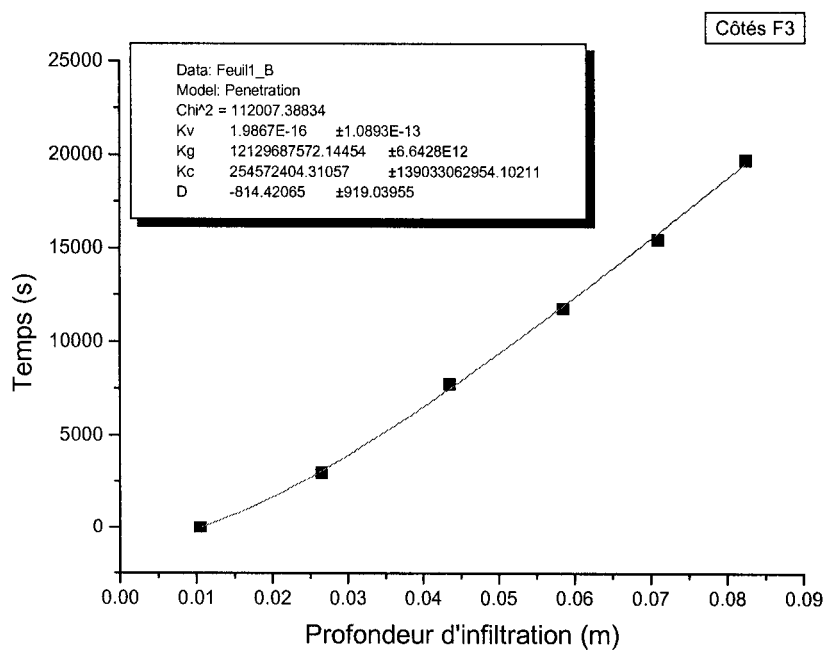
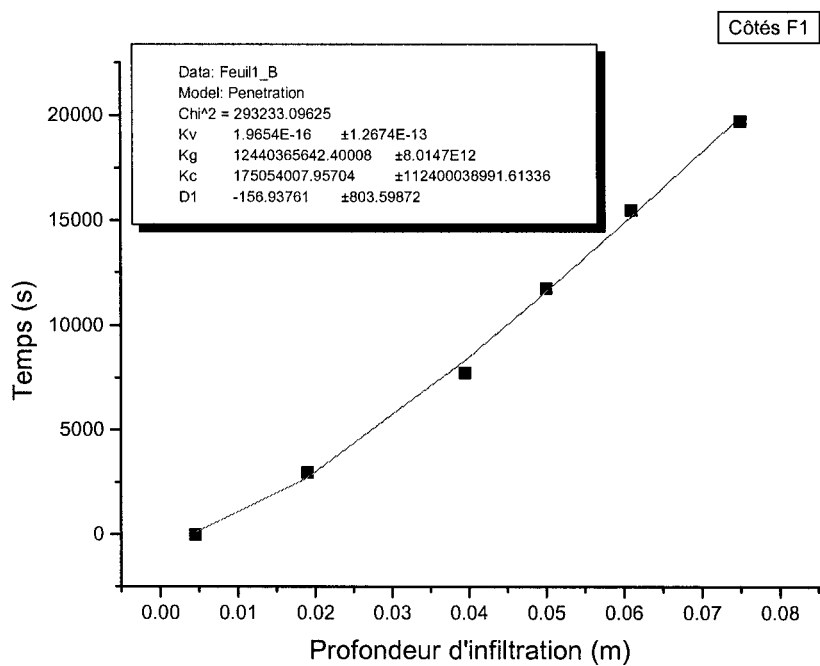
- (35) SOLHEIM A. & ROLSETH S. (2001), Some Surface and Interfacial Phenomena Encountered in Aluminum Electrolysis, Light Metals, The Minerals, Metals and Materials Society
- (36) SOMMER R.A. et al. (1989), Refractories Manual, American Foundrymen's Society
- (37) THOMPSON A.H. et al. (1987), Estimation of Absolute Permeability from Capillary Pressure Measurements, 62nd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, p. 475
- (38) TOFFOLI T. & MARGOLIN N. (1987), Cellular Automata Machines, MIT Press, Boston, USA
- (39) TSUCHINARI A. et al. (1994), Fractal Characteristic of Pores of Porous Spinel Refractory, Taikabatsu Overseas, 14, 2, 14-19
- (40) UTIGARD T. & TOGURI J.M. (1991), Marangoni Flow in the Hall-Heroult Cell, Light Metals, The Minerals, Metals and Materials Society
- (41) VAN BRAKEL J. et al. (1981), Mercury Porosimetry : State of the Art, Powder Technology, 29, 1-12
- (42) ZUSHU LI et al. (2001), Direct Observation of Molten Silver Penetration into Porous Alumina Refractories, Journal of the Technical Association of Refractories, Japon, 21, 2, 65-72

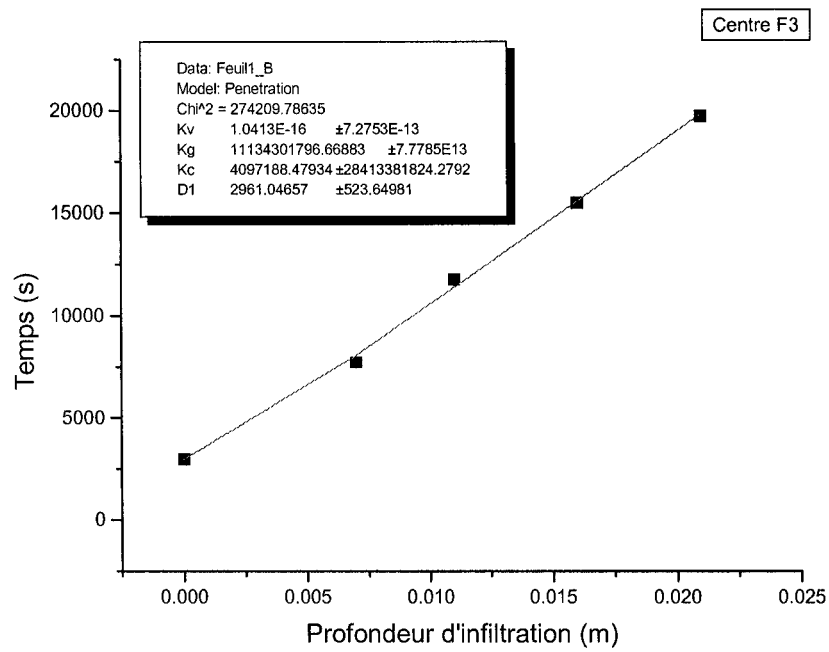
8. ANNEXE A : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

8.1. MATÉRIAU A

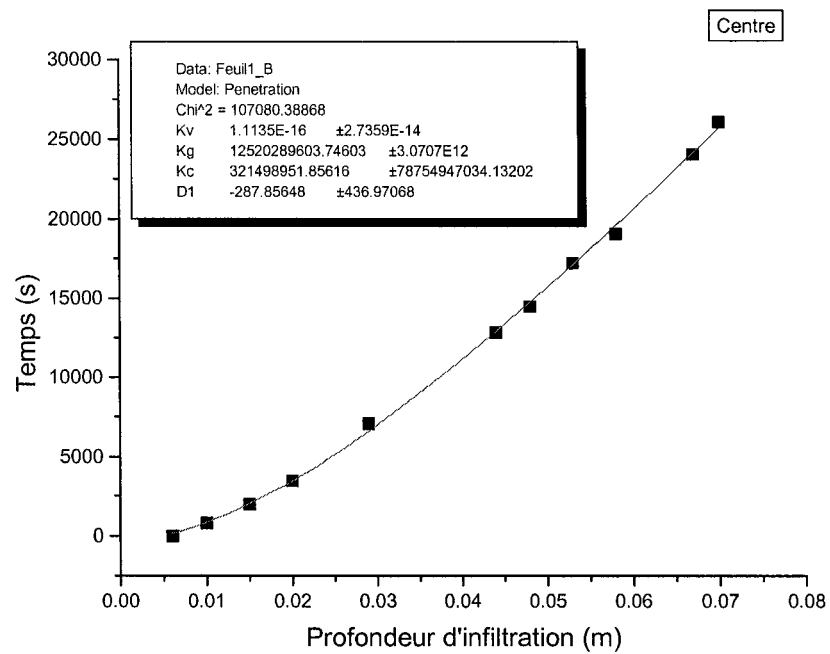
Échantillon A-1

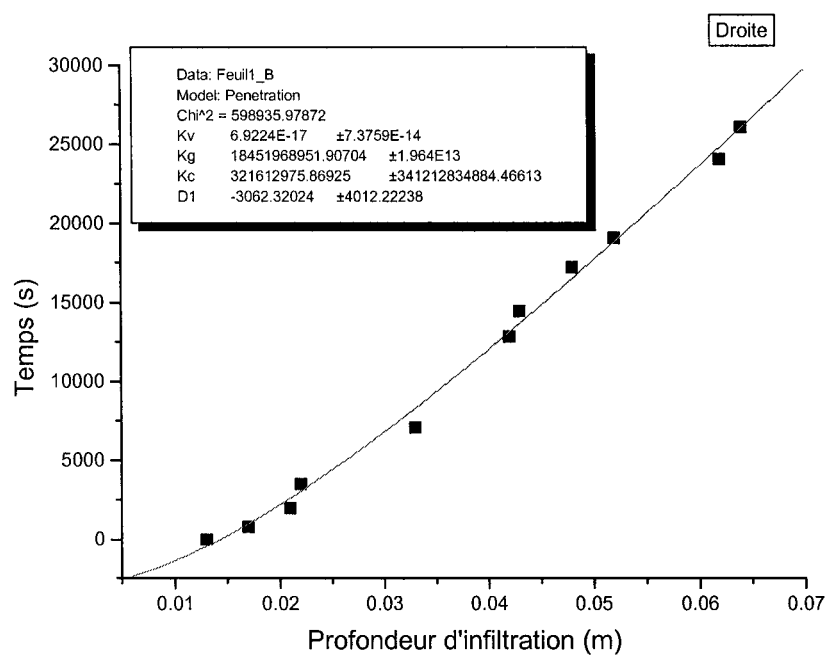
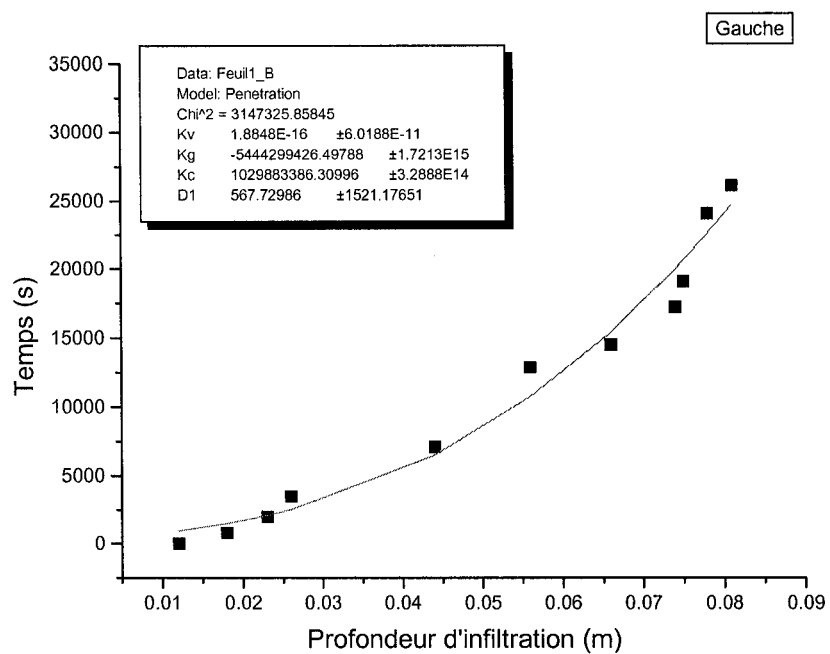


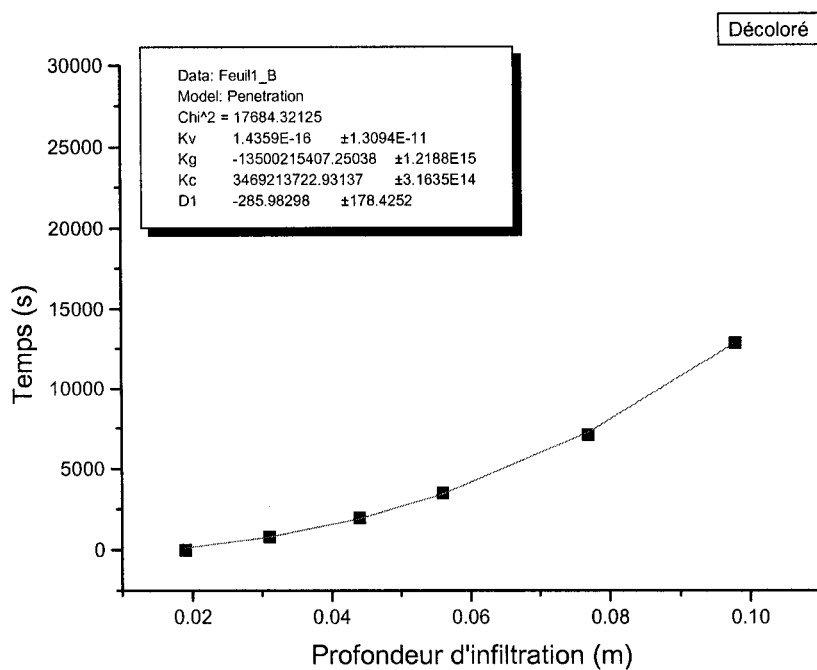




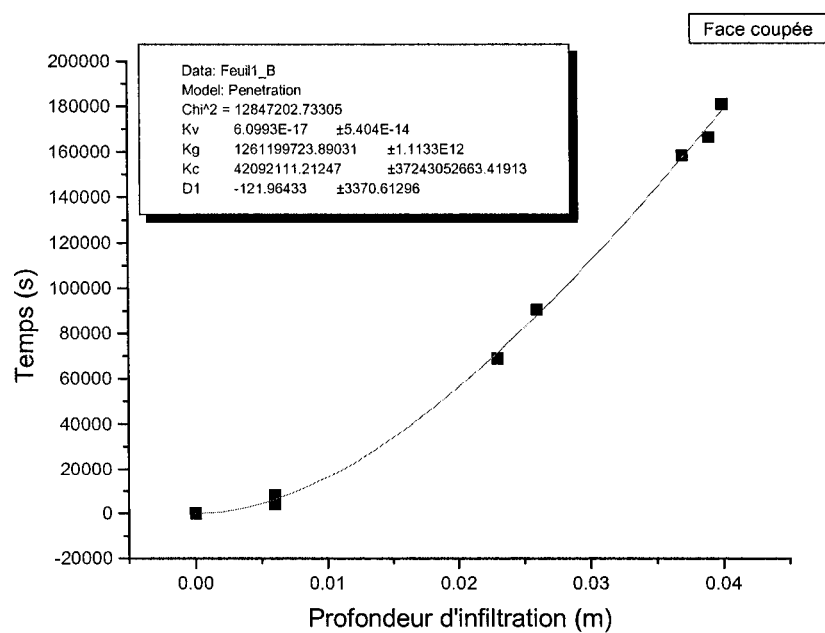
Échantillon A-2

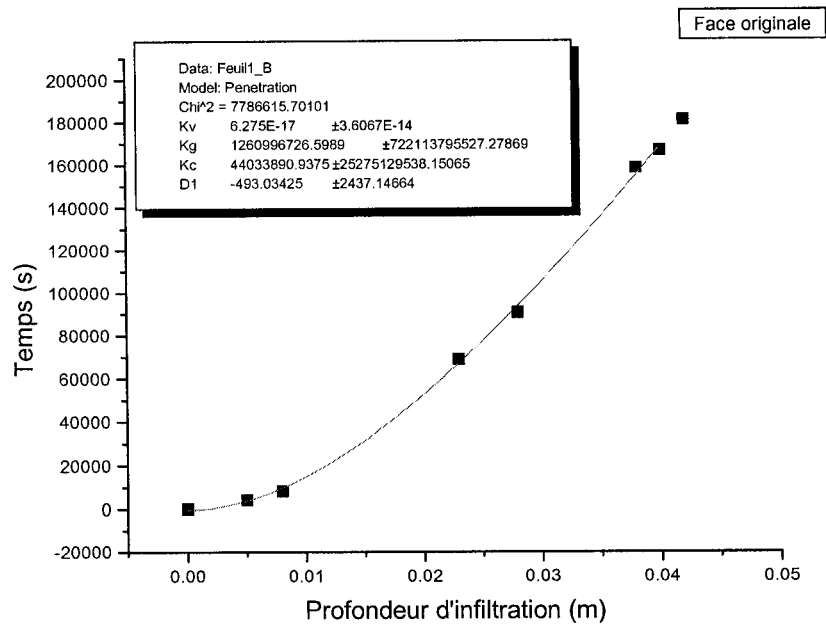




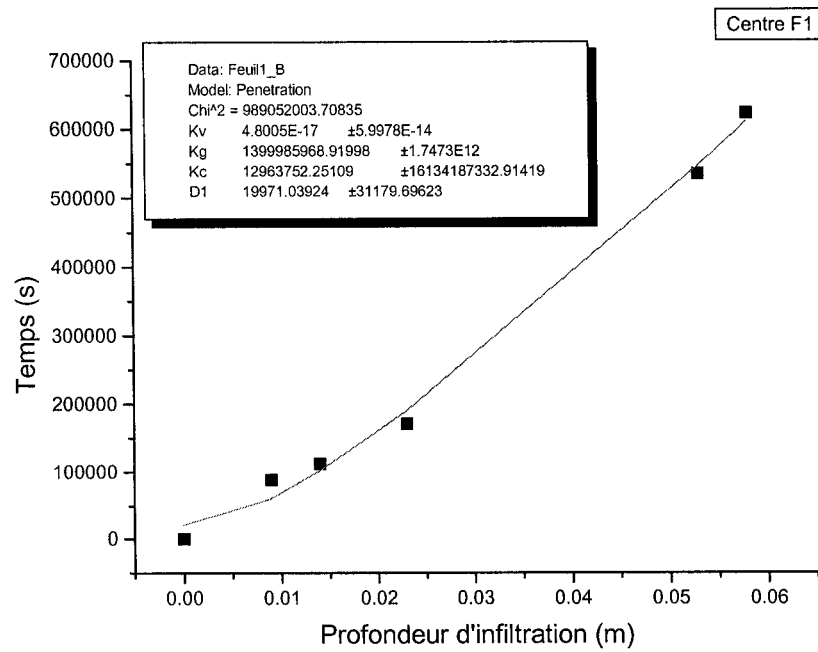


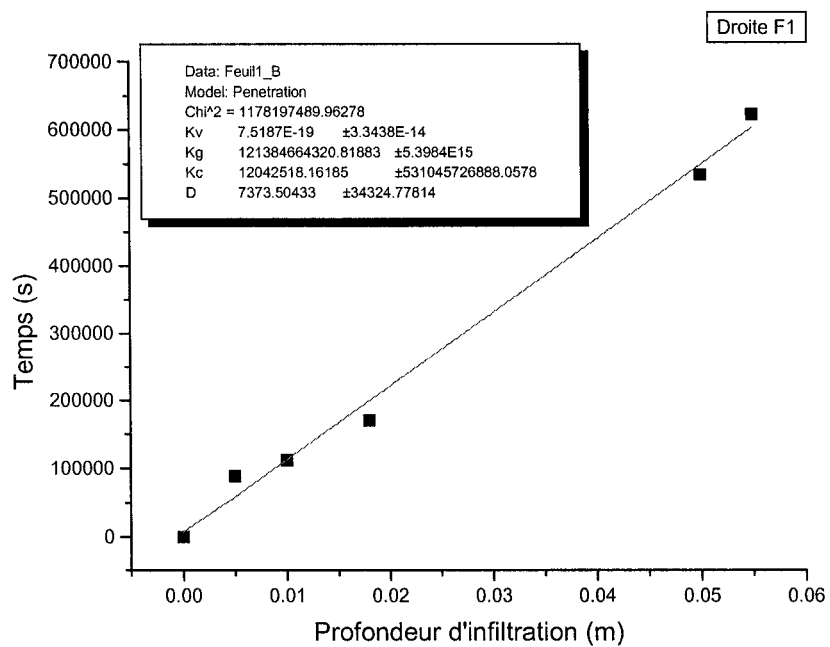
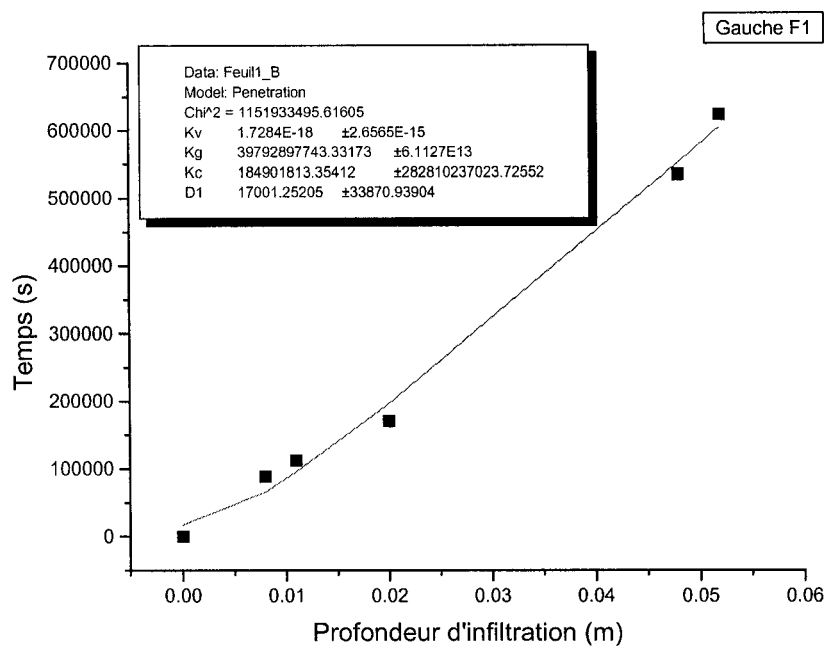
Échantillon A-3

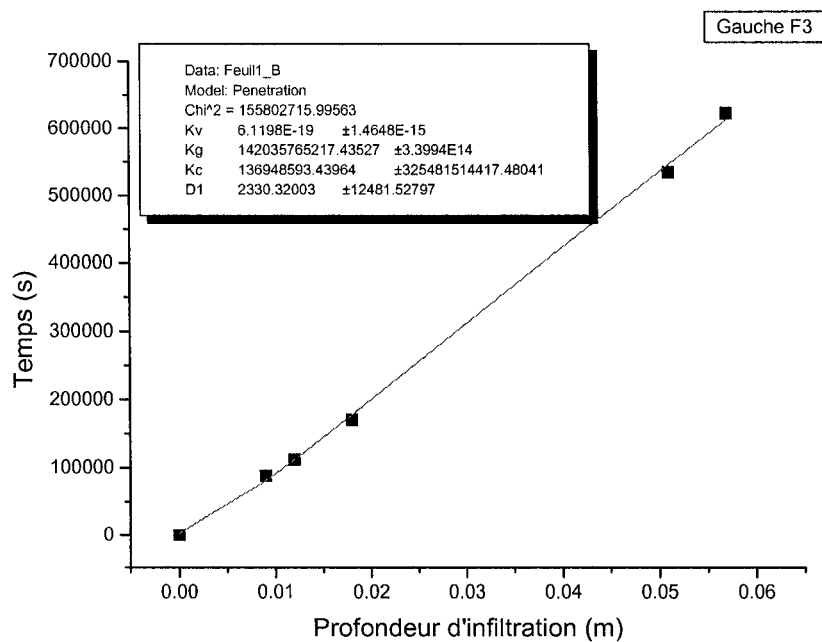
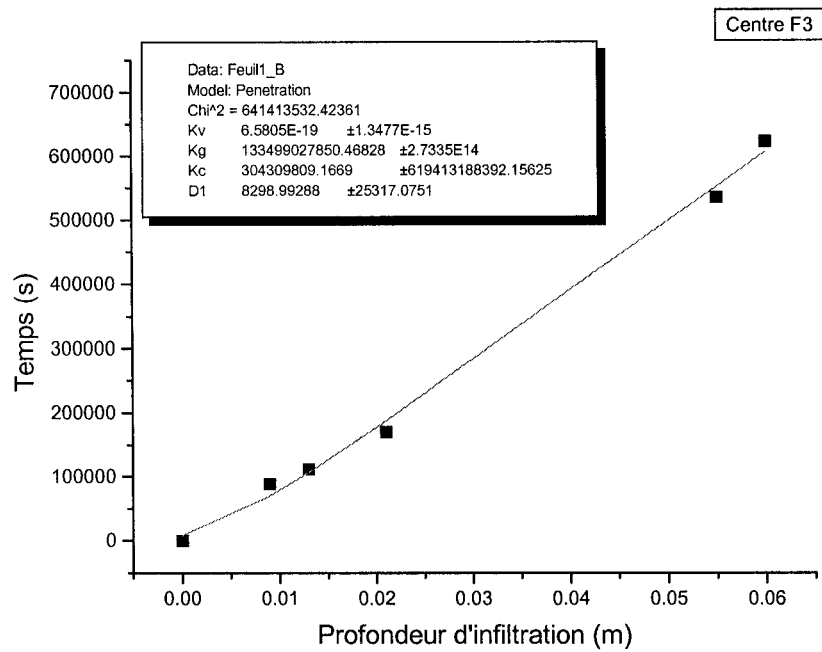


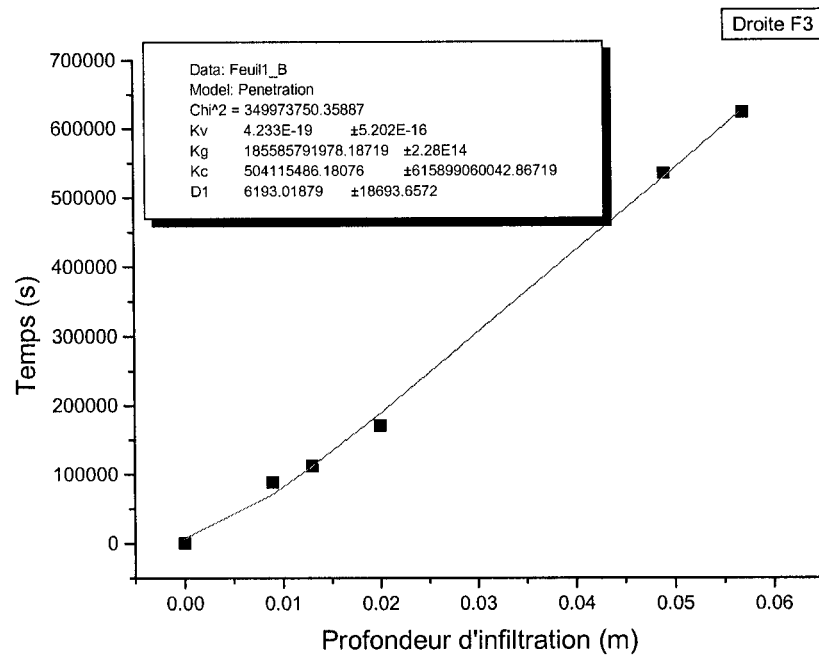


Échantillon A-4



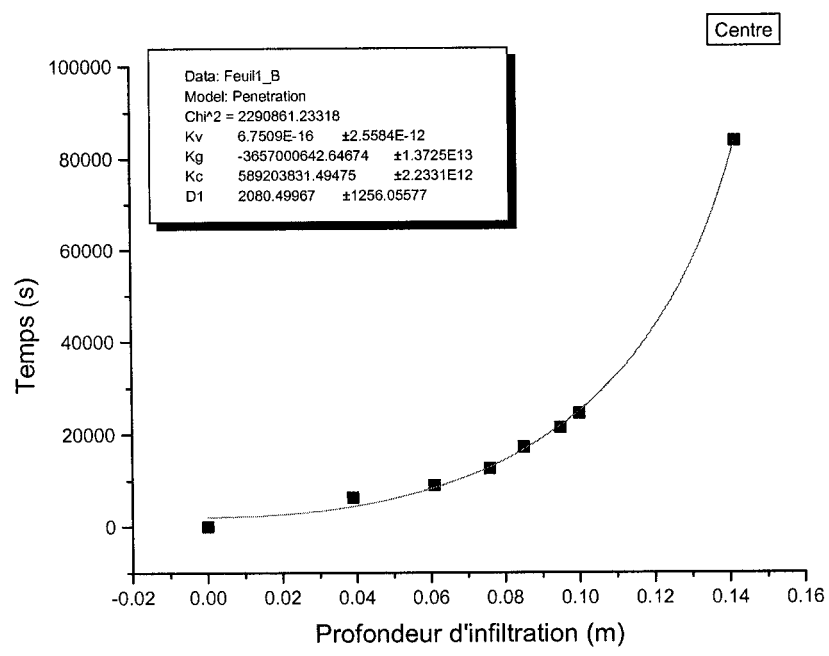




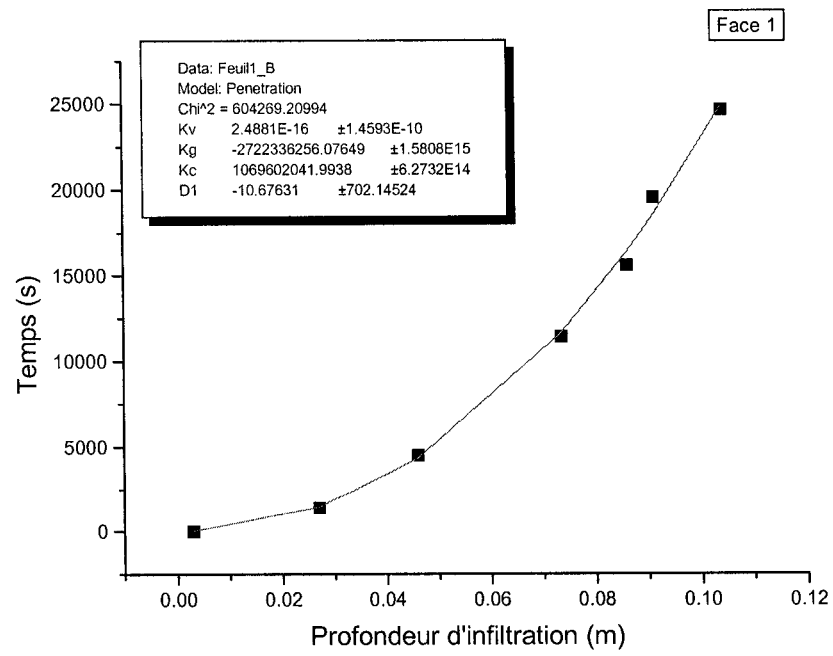


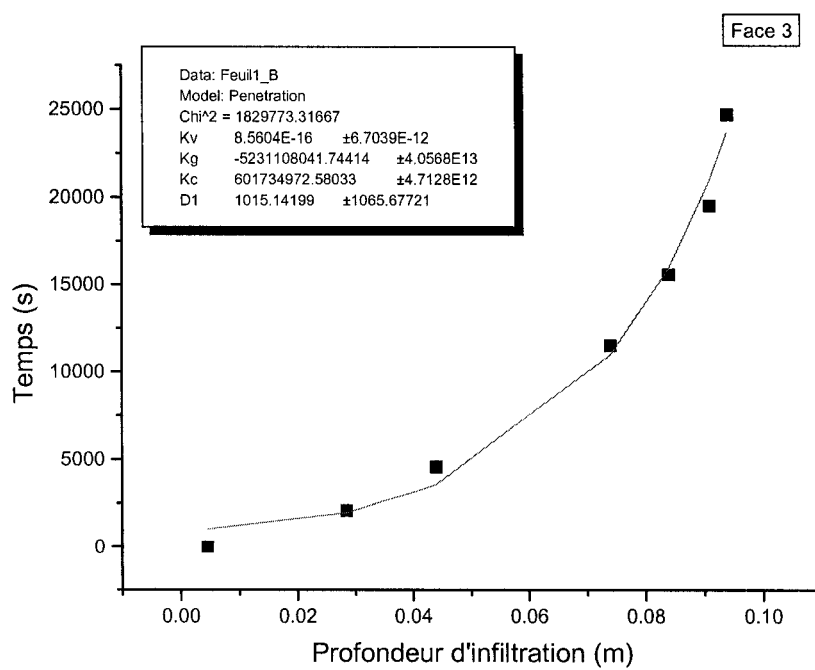
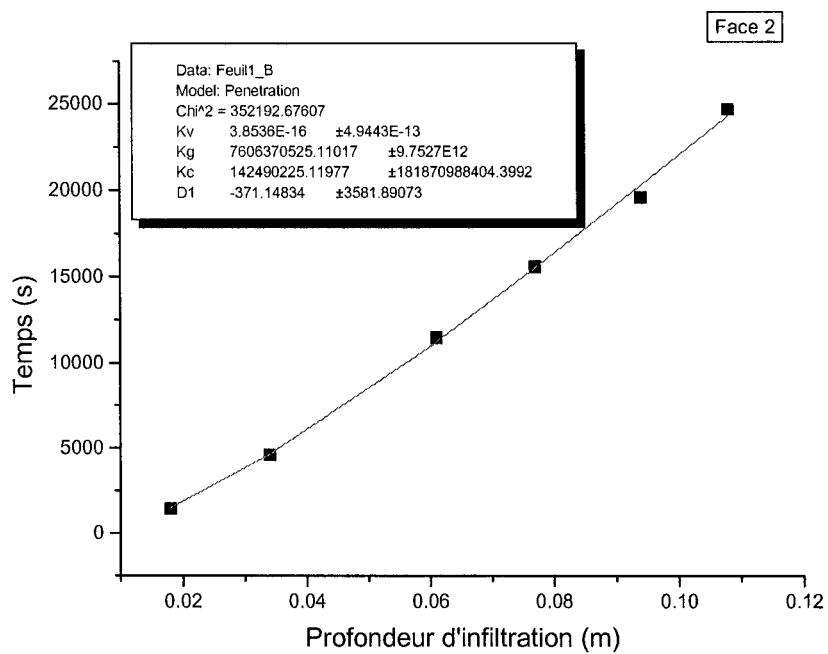
8.2. MATÉRIAU *B*

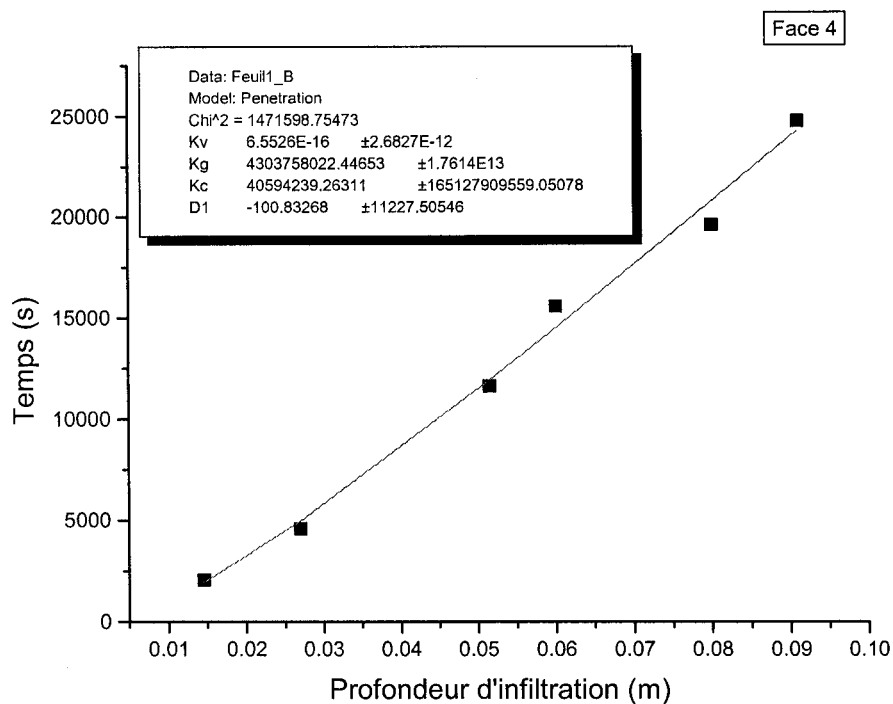
Échantillon B-1



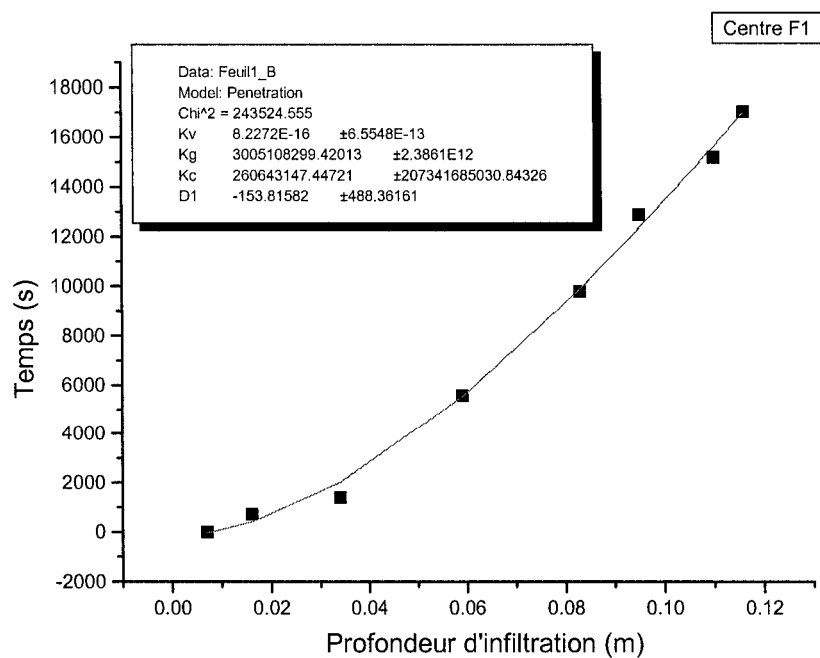
Échantillon B-2

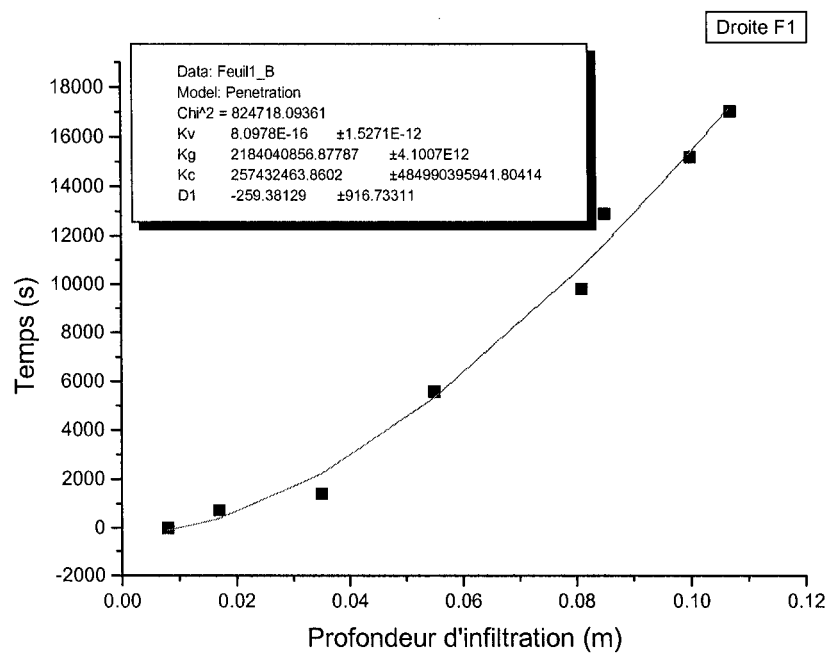
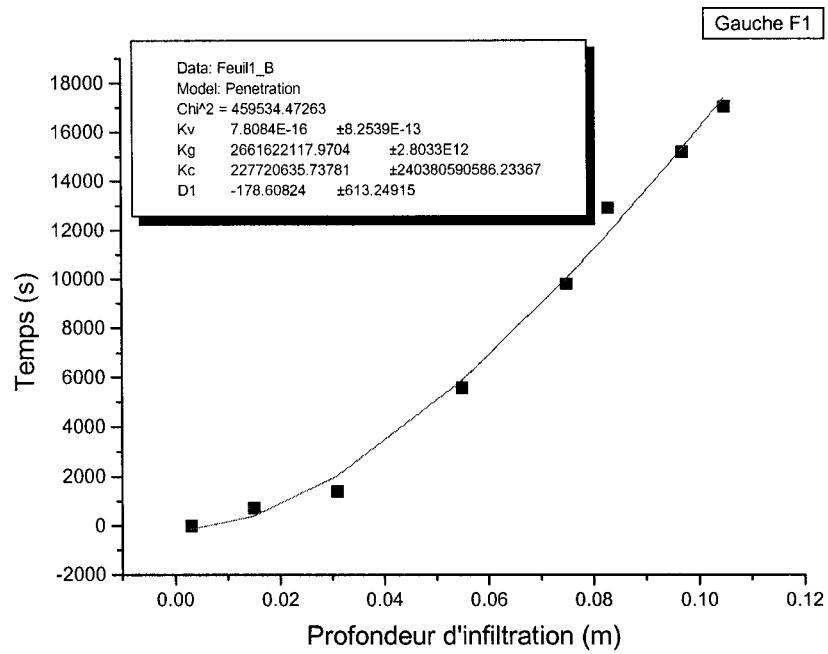


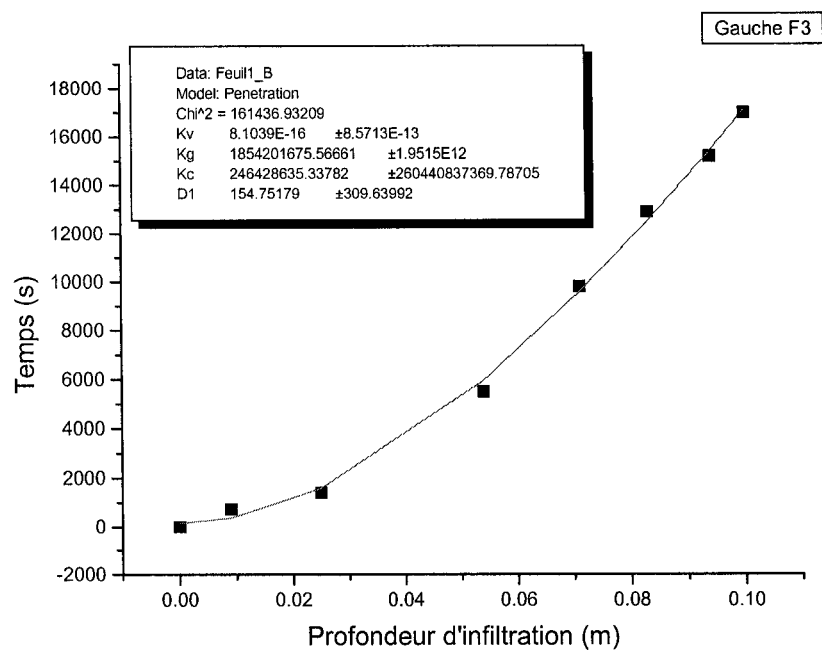
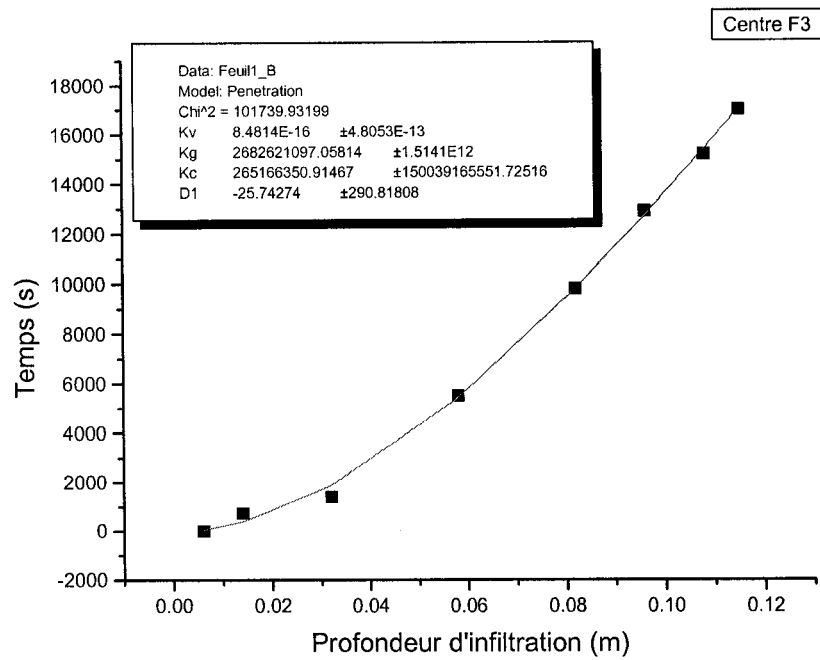


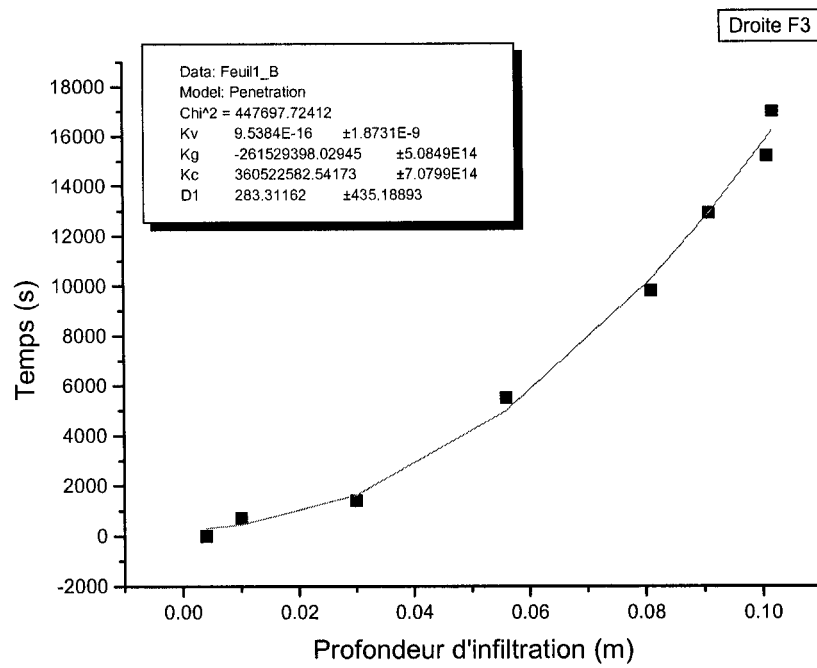


Échantillon B-3

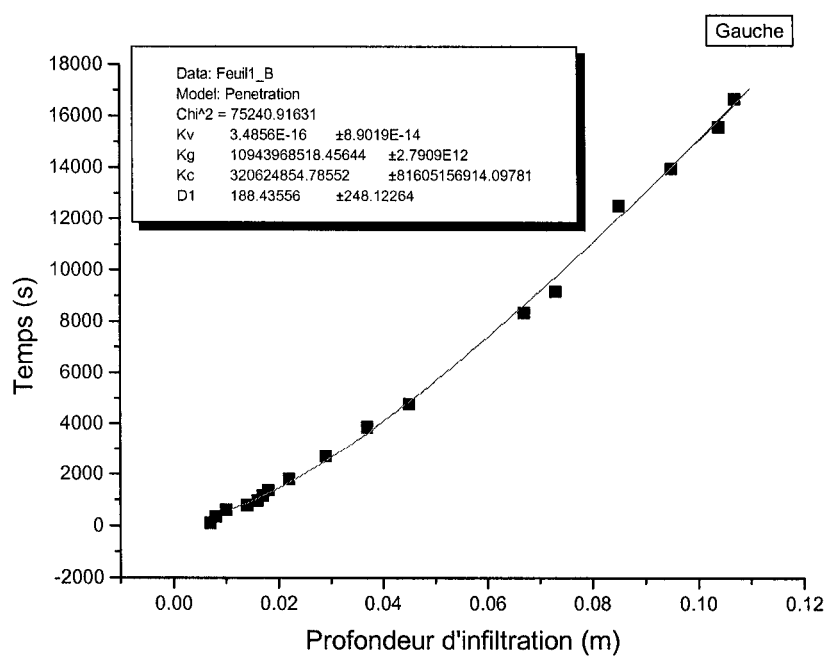
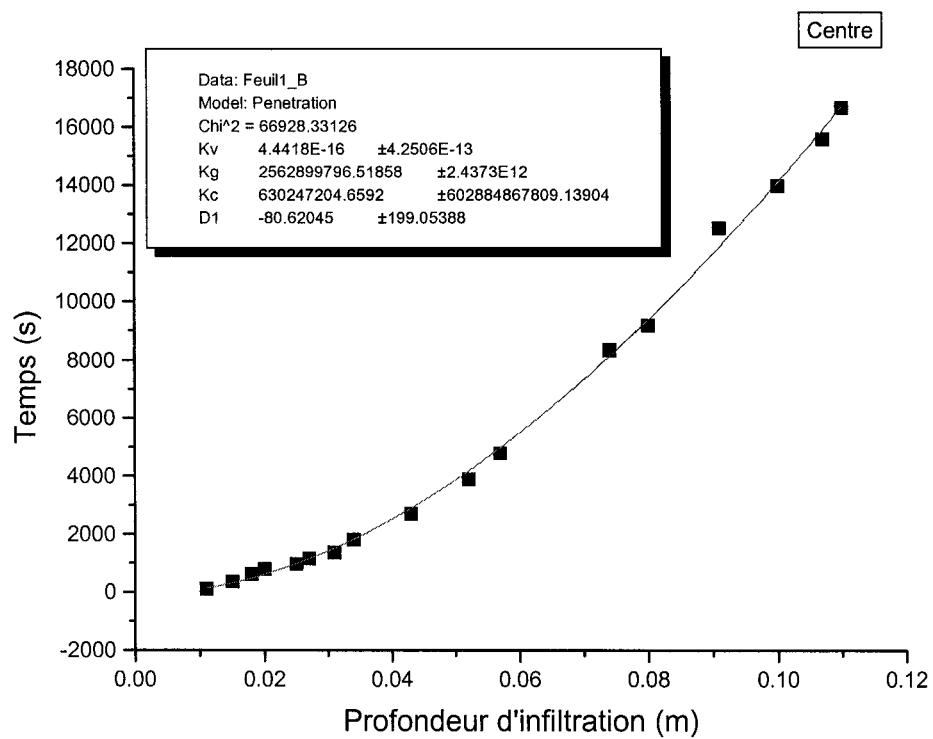




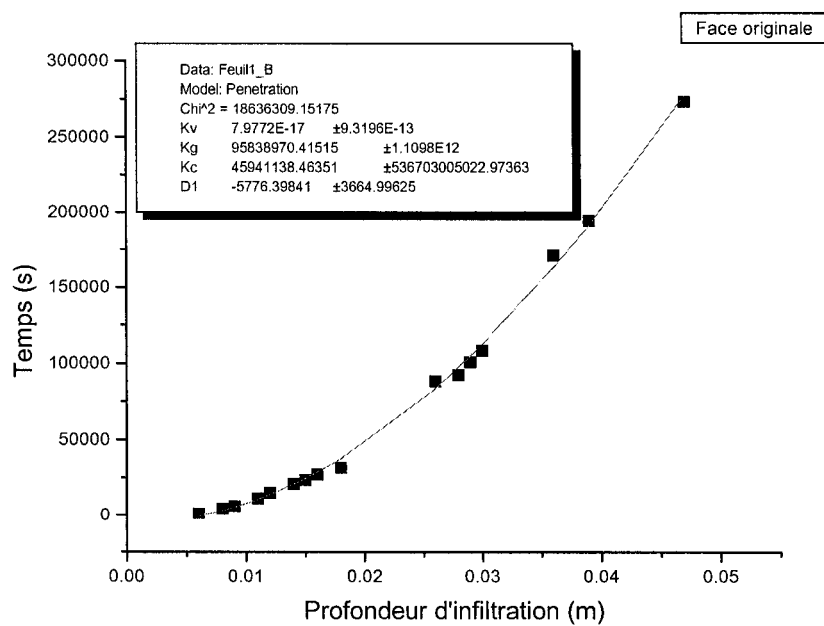
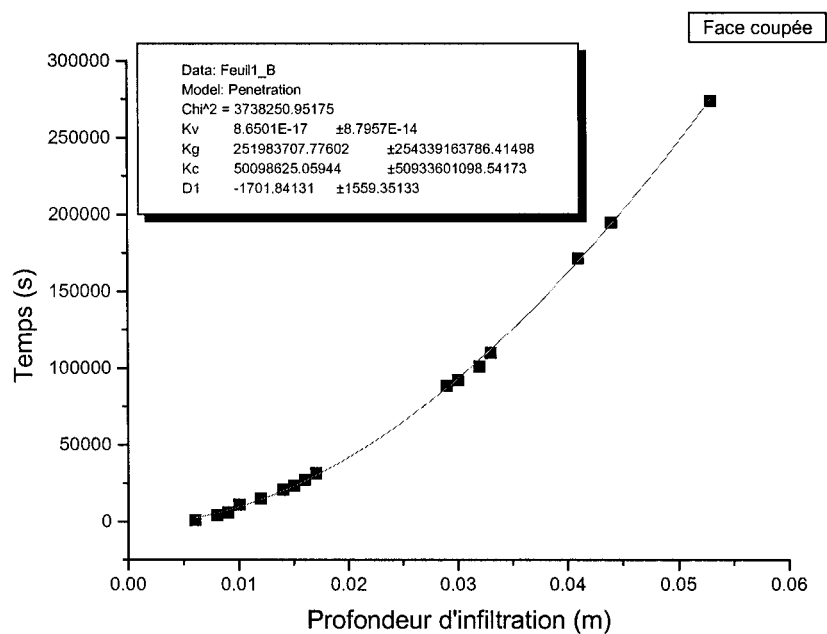




Échantillon B-4

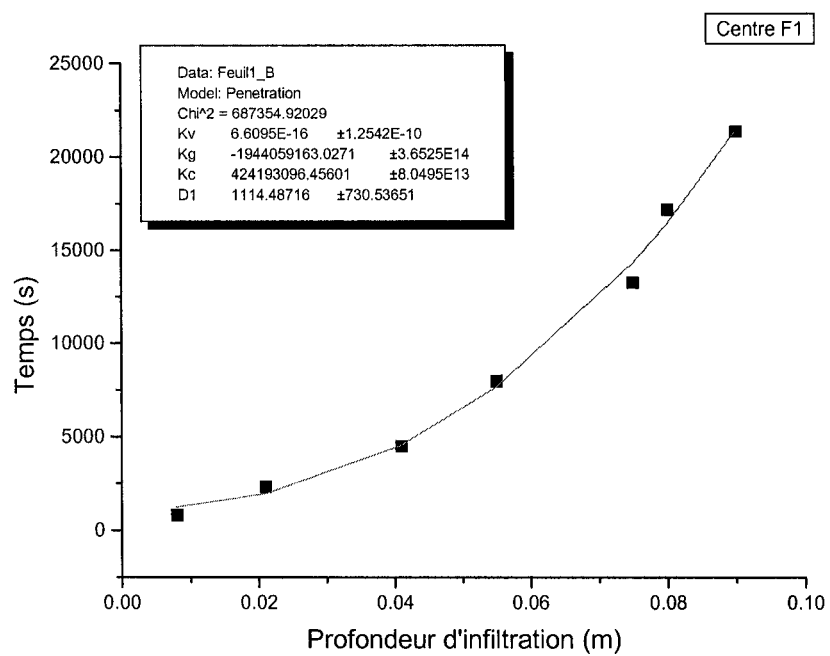


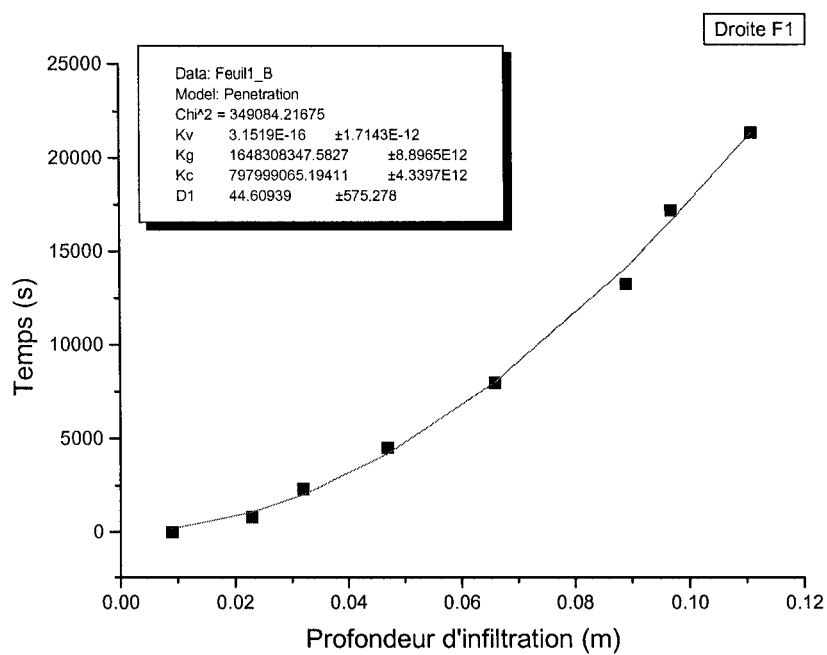
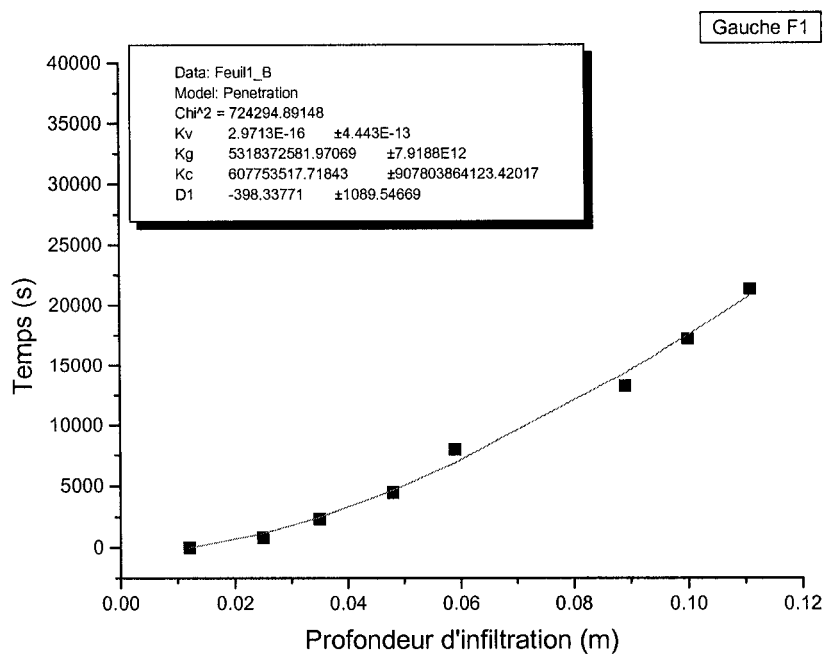
Échantillon B-5

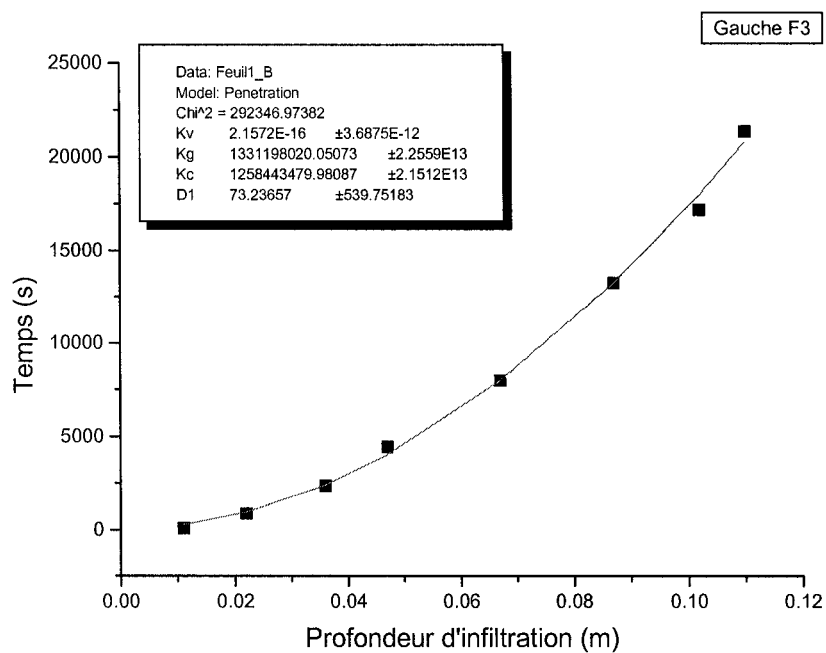
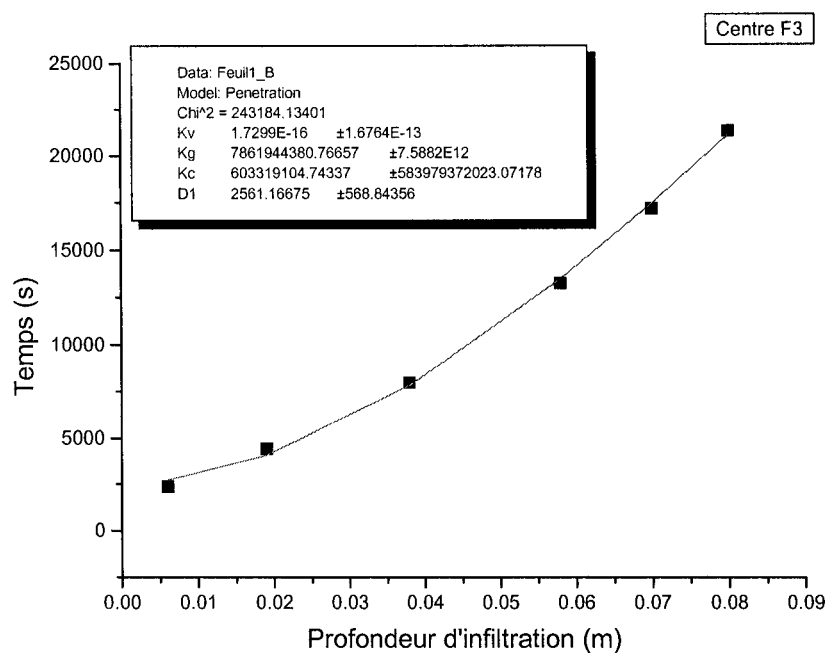


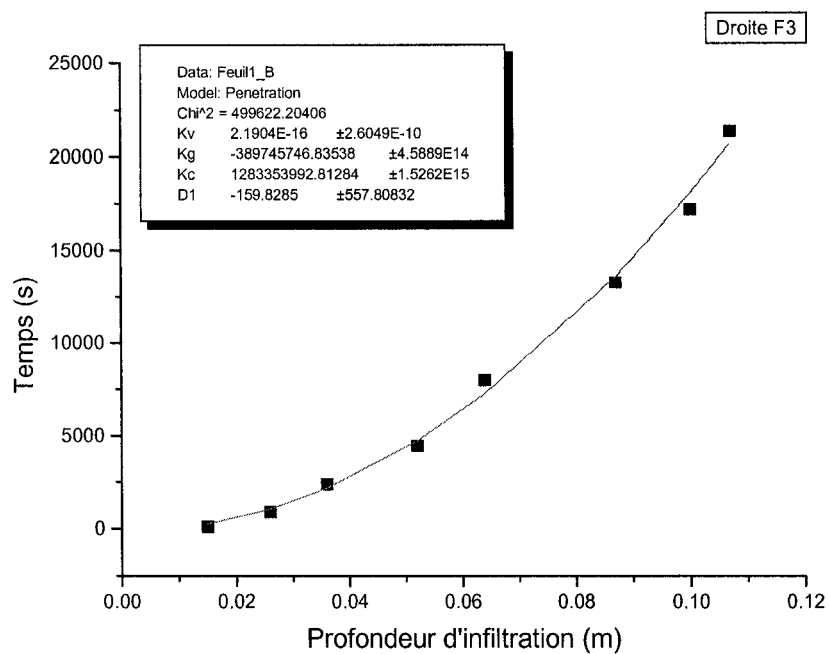
8.3. MATÉRIAU C

Échantillon C-1

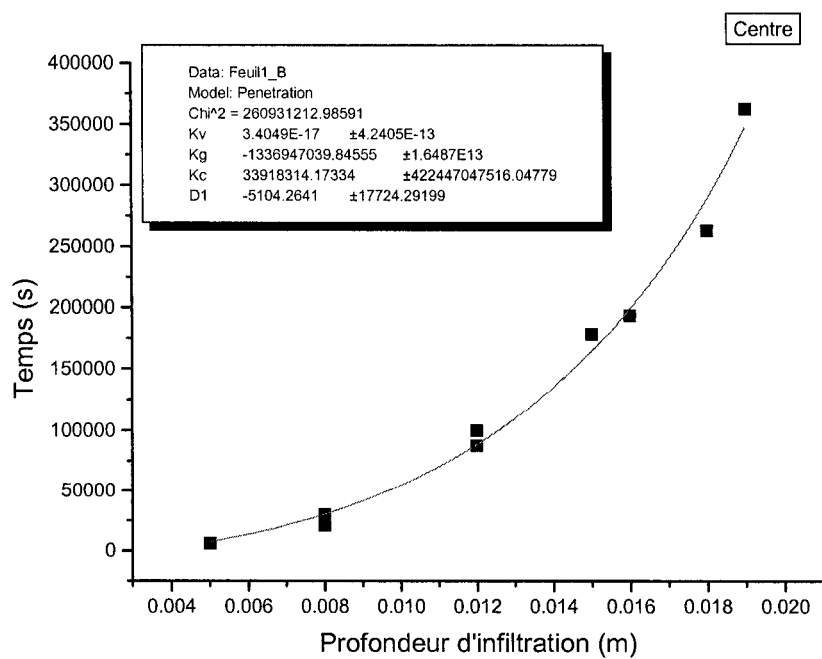


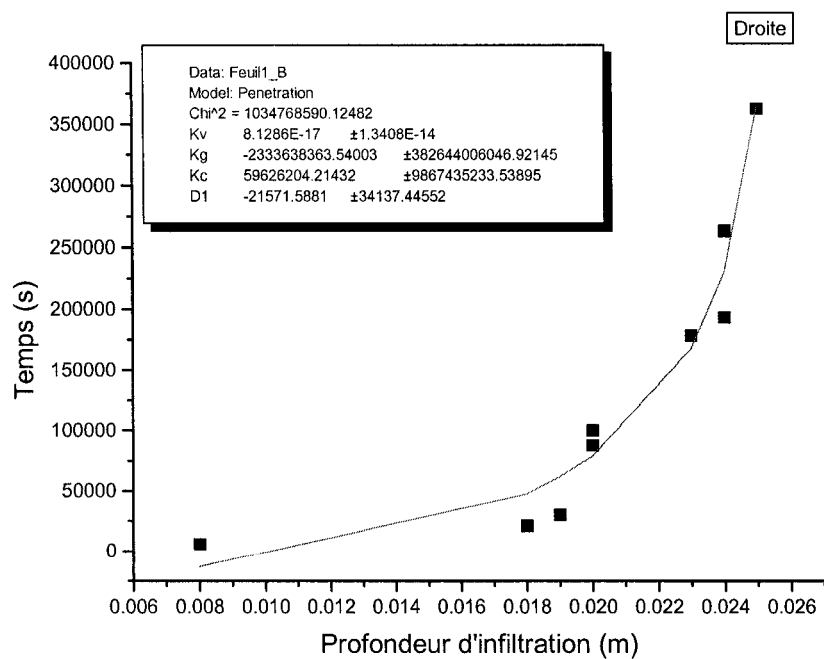
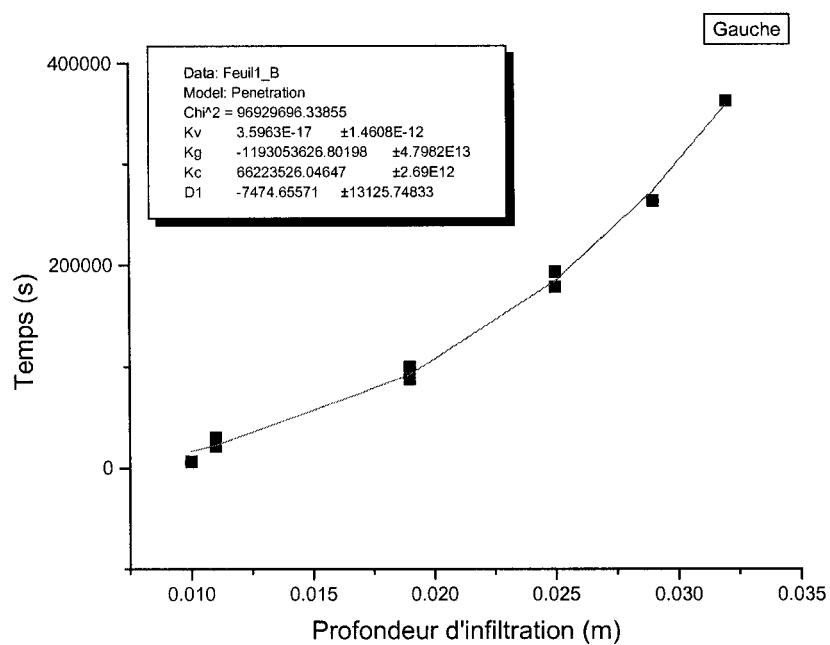


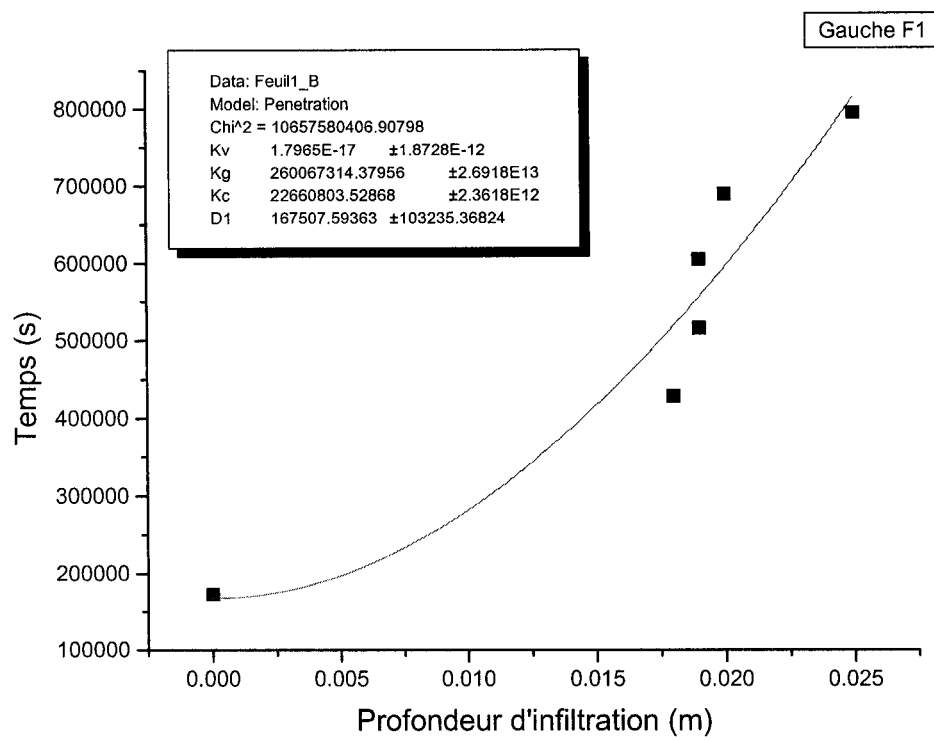


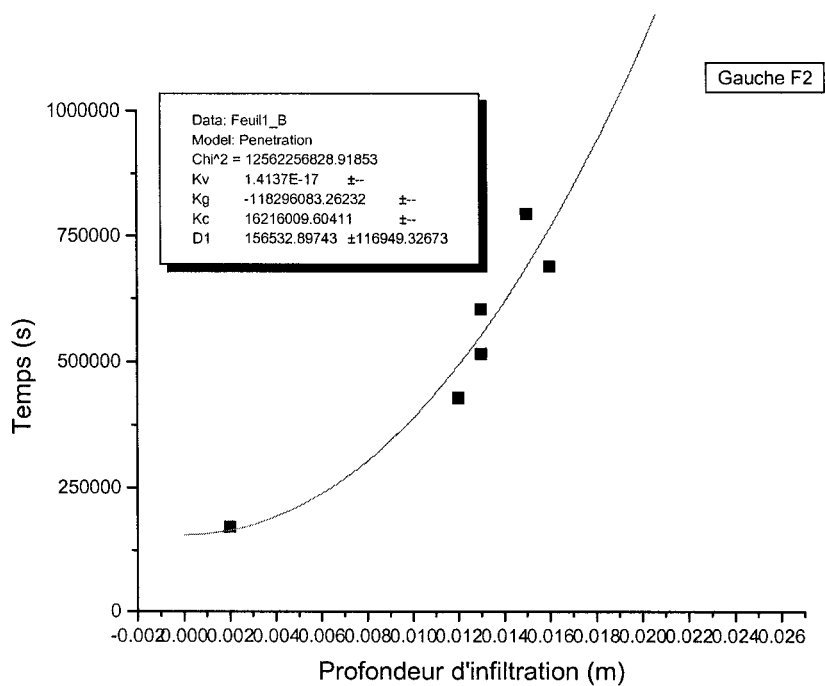
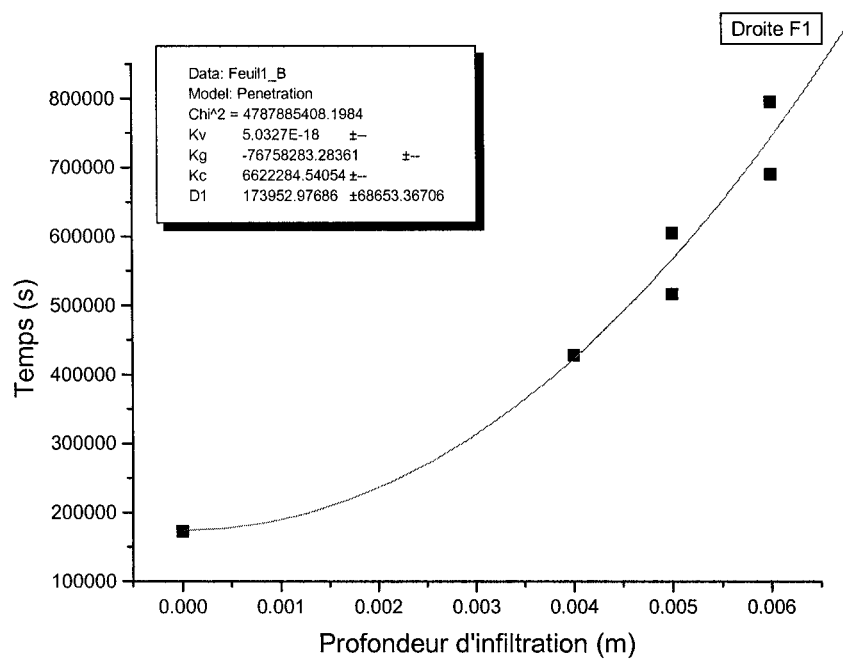


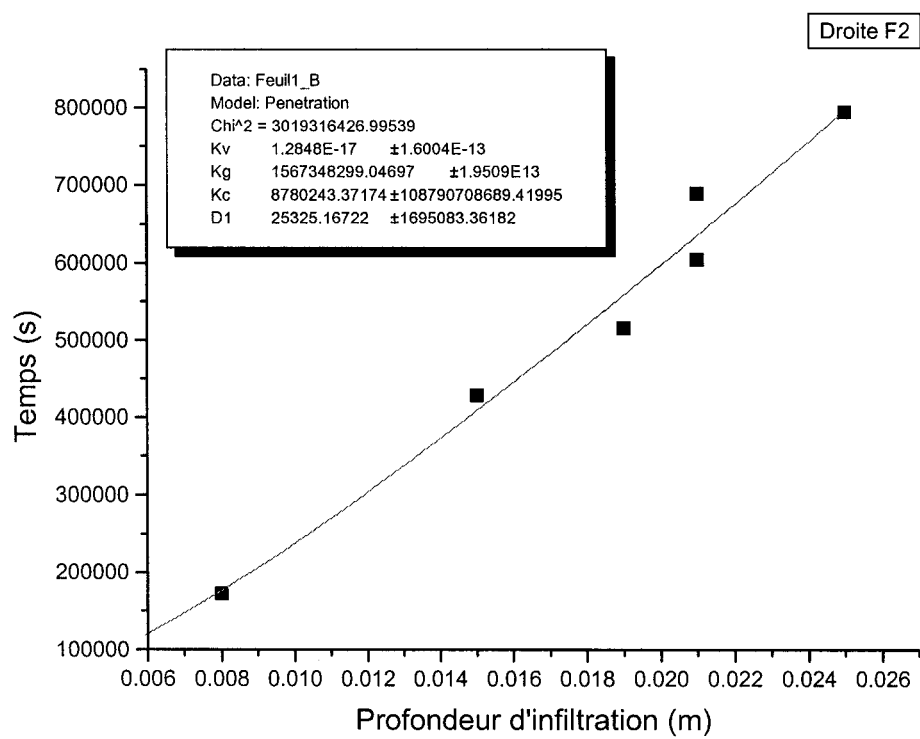
Échantillon C-3





Échantillon C-4





9. ANNEXE B : CODE DU PROGRAMME INFORMATIQUE

Seule la procédure principale du code a été incluse dans cette annexe, afin d'éviter une certaine lourdeur. Le lecteur pourra par ailleurs trouver dans le code des remarques concernant les algorithmes principaux.

' Déclaration des variables

```
Dim i, j, o, p As Integer
Dim NbCell, PasCell, Hauteur, Poids, ProfCreuset, Laps, Pression, DeltaP, Instant, t, a, InstantInit, TInter, PressMax, PressMin,
PressTotal, Profond, PrecProfond As Double
Dim CoteCarre, LongCell, Angle, Tension, Densite, Viscosite, RayMax, Kc, Kg, Kv, Dv, Ds, Porosite, Eta As Double
Dim Ray1, Ray2, Ray3, Ray4, Ray5, Ray6, Ray7, Ray8, Ray9, Ray10 As Double
Dim Prob1, Prob2, Prob3, Prob4, Prob5, Prob6, Prob7, Prob8, Prob9, Prob10 As Double
Dim Kc1, Kv1, Kc2, Kv2, Kc3, Kv3, Kc4, Kv4, Kc5, Kv5, Kc6, Kv6, Kc7, Kv7, Kc8, Kv8, Kc9, Kv9, Kc10, Kv10 As Double
Dim Color020, Color2040, Color4060, Color6080, Color80100 As Double
Dim Debut_Simul As Boolean
Dim TablEchant(1 To 4, 1 To 4) As String
Dim Concentr(1 To 10) As Byte
Dim TablCell1(1 To 4, 1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TablCell2(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TablCell3(1 To 4, 1 To 4, 1 To
100, 1 To 100), TablCell4(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TablCell5(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TablCell6(1 To 4, 1
To 4, 1 To 100, 1 To 100), TablCell7(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TablCell8(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100),
TablCell9(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TablCell10(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100) As Byte
Dim PressHaut(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100) As Double
Dim PressBas(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100) As Double
Dim PressDroite(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100) As Double
Dim PressGauche(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100) As Double
Dim PressControl(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100) As Double
Dim FactEntrant As Byte
Dim TDebut(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100) As Double
Dim TDebut1(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TDebut2(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TDebut3(1 To 4, 1 To 4, 1 To
100, 1 To 100), TDebut4(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TDebut5(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TDebut6(1 To 4, 1 To
4, 1 To 100, 1 To 100), TDebut7(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TDebut8(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TDebut9(1 To
4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), TDebut10(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100) As Double
Dim Avancement(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100) As Integer
Dim Avancement1(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), Avancement2(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), Avancement3(1 To 4, 1
To 4, 1 To 100, 1 To 100), Avancement4(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), Avancement5(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100),
Avancement6(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), Avancement7(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), Avancement8(1 To 4, 1 To
4, 1 To 100, 1 To 100), Avancement9(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100), Avancement10(1 To 4, 1 To 4, 1 To 100, 1 To 100) As
Integer
```

' Procédure associée au bouton "Réinitialiser la simulation"

```
Private Sub Arreter_Click()
Cls
Bouton.Caption = "&Commencer la simulation"
Debut_Simul = True
Arreter.Enabled = False
AffichInstant.Caption = "0"
AffichProfond.Caption = "0"
End Sub
```

' Procédure associée au bouton "Commencer la simulation" ou "Continuer la simulation"

```
Private Sub Bouton_Click()
' La variable booléenne Debut_Simul indique si l'on vient juste de commencer la simulation ou si l'on est à une étape ultérieure
```

```

' On considère d'abord une étape ultérieure
If Debut_Simul = False Then
    VoyantVert.Visible = False
    VoyantRouge.Visible = True
    VoyantText.Caption = "Calcul en cours..."
    Francais.Refresh
' Le programme va maintenant rafraîchir l'affichage, cad réafficher l'échantillon
' Les variables i et j désignent les coordonnées des cases de réfractaires (de 1 à 4)
    For i = 1 To 4
        For j = 1 To 4
' Affichage des cases vertes (réfractaire) selon la géométrie choisie
            If TablEchant(i, j) = " 2" Then
                CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1))
                CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1))
                NewX = CoordX + (NbCell * PasCell)
                NewY = CoordY + (NbCell * PasCell)
                Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(10), BF
            End If
        Next j
    Next i
' Affichage des cases bleues (métal)
    For i = 1 To 4
        For j = 1 To 4
' Les variables o et p désignent les coordonnées des cellules à l'intérieur d'une case (de 1 à NbCell)
            If TablEchant(i, j) = " 2" Then
                If i > 1 Then
                    If TablEchant(i - 1, j) = " 3" Then
                        CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) - PasCell
                        CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1))
                        NewX = CoordX + PasCell
                        NewY = CoordY + (NbCell * PasCell)
                        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(1), BF
                        Diff = -1
                    End If
                    For k = j To 4
                        If TablEchant(i - 1, k) = " 3" Then Diff = Diff + 1
                    Next k
                    For p = 1 To NbCell
                        TablCell1(i - 1, j, NbCell, p) = 150
                        Pression = Kc + ((Hauteur - (Diff * CoteCarre + ((NbCell - p) / NbCell) * CoteCarre)) * Densite * 9.80665)
                        PressGauche(i, j, 1, p) = Pression
                        Avancement(i, j, 1, p) = 1
                    Next p
                End If
            End If
            If j > 1 Then
                If TablEchant(i, j - 1) = " 3" Then
                    CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1))
                    CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) - PasCell
                    NewX = CoordX + (NbCell * PasCell)
                    NewY = CoordY + PasCell
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(1), BF
                End If
                For o = 1 To NbCell
                    TablCell1(i, j - 1, o, NbCell) = 150
                    Pression = Kc + Densite * 9.80665 * Hauteur
                    PressHaut(i, j, o, 1) = Pression
                    Avancement(i, j, o, 1) = 1
                Next o
            End If
        End If
    End If
    If i < 4 Then
        If TablEchant(i + 1, j) = " 3" Then
            CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * i)
            CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1))
            NewX = CoordX + PasCell
            NewY = CoordY + (PasCell * NbCell)
            Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(1), BF
        End If
    End If

```

```

Diff = -1
For k = j To 4
    If TablEchant(i + 1, k) = " 3" Then Diff = Diff + 1
Next k
For p = 1 To NbCell
    TablCell1(i + 1, j, 1, p) = 150
    Pression = Kc + ((Hauteur - (Diff * CoteCarre + ((NbCell - p) / NbCell) * CoteCarre)) * Densite * 9.80665)
    PressDroite(i, j, NbCell, p) = Pression
    Avancement(i, j, NbCell, p) = 1
Next p
End If
End If
If j < 4 Then
    If TablEchant(i, j + 1) = " 3" Then
        CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1))
        CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * j)
        NewX = CoordX + (NbCell * PasCell)
        NewY = CoordY + PasCell
        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(1), BF
        For o = 1 To NbCell
            TablCell1(i, j + 1, o, 1) = 150
            Pression = Kc + Densite * 9.80665 * Hauteur
            PressBas(i, j, o, NbCell) = Pression
            Avancement(i, j, o, NbCell) = 1
        Next o
    End If
End If
Next j
Next i

' Renvoi à d'autres routines, selon le mode, pour déterminer le nouvel état du système
If Front.Checked = True Then
    Calcul_Front
End If

If Concentration.Checked = True Then
    Calcul_Concentration
End If

End If

' On considère maintenant le cas du début de simulation
If Debut_Simul = True Then
    ' Contrôle du programme pour vérifier si tous les paramètres ont été définis
    If Main_Geometrie.Text = "" Then
        Data = MsgBox("Vous devez définir la géométrie de l'échantillon avant de commencer la simulation.", vbOKOnly + vbSystemModal, "Attention !")
        GoTo Fin
    End If
    If Main_Metal.Text = "" Then
        Data = MsgBox("Vous devez définir les paramètres du métal liquide avant de commencer la simulation.", vbOKOnly + vbSystemModal, "Attention !")
        GoTo Fin
    End If
    If Pression_Hauteur.Value = True And HautLiq.Text = "" Then
        Data = MsgBox("Vous devez définir la hauteur de liquide avant de commencer la simulation.", vbOKOnly + vbSystemModal, "Attention !")
        GoTo Fin
    End If
    If Pression_Poids.Value = True And PoidsLiq.Text = "" And ProfLiq = "" Then
        Data = MsgBox("Vous devez définir le poids du liquide et la profondeur du creuset avant de commencer la simulation.", vbOKOnly + vbSystemModal, "Attention !")
        GoTo Fin
    End If
    Hauteur = 0.1234

```



```

Poids = 0.1234
If Pression_Hauteur.Value = True Then
    Hauteur = Val(HautLiq.Text) / 100
Else
    Poids = Val(PoidsLiq.Text)
    ProfCreuset = Val(ProfLiq.Text)
End If
If Main_Refractaire.Text = "" Then
    Data = MsgBox("Vous devez définir les paramètres du réfractaire avant de commencer la simulation.", vbOKOnly +
vbSystemModal, "Attention !")
    GoTo Fin
End If
If NombreCell.Text = "" Then
    Data = MsgBox("Vous devez définir le nombre de cellules avant de commencer la simulation.", vbOKOnly + vbSystemModal,
"Attention !")
    GoTo Fin
End If
NbCell = Val(NombreCell.Text)
PasCell = 7335 / 4 / NbCell
If LapsTemps.Text = "" Then
    Data = MsgBox("Vous devez définir le laps de temps avant de commencer la simulation.", vbOKOnly + vbSystemModal,
"Attention !")
    GoTo Fin
End If
If Secondes.Value = True Then Laps = Val(LapsTemps.Text)
If Minutes.Value = True Then Laps = Val(LapsTemps.Text) * 60
If Heures.Value = True Then Laps = Val(LapsTemps.Text) * 3600
If Jours.Value = True Then Laps = Val(LapsTemps.Text) * 86400
' Initialisation des cellules
For i = 1 To 4
    For j = 1 To 4
        For o = 1 To NbCell
            For p = 1 To NbCell
' Les variables TablCell déterminent si la catégorie de pores dans la cellule de coordonnée i,j,o,p est remplie (255=vide)
                TablCell1(i, j, o, p) = 255
                TablCell2(i, j, o, p) = 255
                TablCell3(i, j, o, p) = 255
                TablCell4(i, j, o, p) = 255
                TablCell5(i, j, o, p) = 255
                TablCell6(i, j, o, p) = 255
                TablCell7(i, j, o, p) = 255
                TablCell8(i, j, o, p) = 255
                TablCell9(i, j, o, p) = 255
                TablCell10(i, j, o, p) = 255
' Les variables PressHaut, PressBas, PressDroite et PressGauche correspondent aux pressions exercées sur les bords de la cellule
                PressHaut(i, j, o, p) = 0
                PressBas(i, j, o, p) = 0
                PressDroite(i, j, o, p) = 0
                PressGauche(i, j, o, p) = 0
                PressControl(i, j, o, p) = 0
' Les variables Tdebut déterminent le temps relatif nécessaire pour remplir la catégorie de pores dans la cellule
                TDebut(i, j, o, p) = -1
                TDebut1(i, j, o, p) = -1
                TDebut2(i, j, o, p) = -1
                TDebut3(i, j, o, p) = -1
                TDebut4(i, j, o, p) = -1
                TDebut5(i, j, o, p) = -1
                TDebut6(i, j, o, p) = -1
                TDebut7(i, j, o, p) = -1
                TDebut8(i, j, o, p) = -1
                TDebut9(i, j, o, p) = -1
                TDebut10(i, j, o, p) = -1
' Les variables Avancement déterminent l'état d'avancement de l'infiltration pour chaque cellule
                Avancement(i, j, o, p) = 0
                Avancement1(i, j, 1, p) = 0
                Avancement2(i, j, 1, p) = 0

```

```

        Avancement3(i, j, 1, p) = 0
        Avancement4(i, j, 1, p) = 0
        Avancement5(i, j, 1, p) = 0
        Avancement6(i, j, 1, p) = 0
        Avancement7(i, j, 1, p) = 0
        Avancement8(i, j, 1, p) = 0
        Avancement9(i, j, 1, p) = 0
        Avancement10(i, j, 1, p) = 0
    Next p
Next o
Next j
Next i
' La variable Instant désigne le temps absolu
Instant = 0
' Lecture des paramètres de géométrie de l'échantillon dans le fichier
Open "Echantillon.tmp" For Input As #1
Line Input #1, Data
Line Input #1, Data
' La variable CoteCarre est la longueur en cm d'un côté de case
CoteCarre = Val(Data) / 100
UniteLong.Caption = Str(CoteCarre * 100) + " cm"
LongCell = CoteCarre / NbCell
For i = 1 To 4
    For j = 1 To 4
        Line Input #1, Data
        TablEchant(i, j) = Data
        If Data = " 2" Then
            For o = 1 To NbCell
                For p = 1 To NbCell
                    TablCell1(i, j, o, p) = 0
                    TablCell2(i, j, o, p) = 0
                    TablCell3(i, j, o, p) = 0
                    TablCell4(i, j, o, p) = 0
                    TablCell5(i, j, o, p) = 0
                    TablCell6(i, j, o, p) = 0
                    TablCell7(i, j, o, p) = 0
                    TablCell8(i, j, o, p) = 0
                    TablCell9(i, j, o, p) = 0
                    TablCell10(i, j, o, p) = 0
                Next p
            Next o
        ' Affichage de l'échantillon
        CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1))
        CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1))
        NewX = CoordX + (NbCell * PasCell)
        NewY = CoordY + (NbCell * PasCell)
        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(10), BF
    End If
Next j
Next i
Close #1
Kc = 0.1234
Kv = 0.1234
' Lecture des paramètres du métal dans le fichier
Open "Metal.tmp" For Input As #1
Line Input #1, Data
Line Input #1, Data
' Une ligne dans le fichier indique si les paramètres sont des données microscopiques ("Micro") ou un critère général ("Critere")
If Data = "Micro" Then
    Line Input #1, Data
    Angle = Val(Data) * 3.141592654 / 180
    Line Input #1, Data
    Tension = Val(Data) / 1000
Else
    Line Input #1, Data
    Kc = Val(Data)

```

```

End If
Line Input #1, Data
Densite = Val(Data)
Line Input #1, Data
If Data = "Micro" Then
    Line Input #1, Data
    Viscosite = Val(Data) / 1000
Else
    Line Input #1, Data
    Kv = Val(Data)
End If
Close #1
' Lecture des paramètres du réfractaire dans le fichier
Open "Refractaire.tmp" For Input As #1
Line Input #1, Data
Line Input #1, Data
' Une ligne dans le fichier indique si le mode est Front de pénétration (avec un diamètre de pore unique) ou Concentration de métal
(avec une distribution en taille)
If Data = "Front" Then
    Line Input #1, Data
    RayMax = Val(Data) / 2000000
    If Kc = 0.1234 Then
        Kc = 2 * Tension * Cos(Angle) / RayMax
    End If
    If Kv = 0.1234 Then
        Kv = RayMax * RayMax / 8 / Viscosite
    End If
End If
' Les variables Ray désignent les rayons de chaque catégorie de pore et les variables Prob désignent les probabilités d'existence de
chaque catégorie de pore
If Data = "Concentration" Then
    Line Input #1, Data1
    Line Input #1, Data2
    Ray1 = (Val(Data1) + Val(Data2) / 2) / 2000000
    Kc1 = 2 * Tension * Cos(Angle) / Ray1
    Kv1 = Ray1 * Ray1 / 8 / Viscosite
    Line Input #1, Data
    Prob1 = Val(Data)
    Line Input #1, Data2
    Line Input #1, Data1
    Ray2 = (Val(Data1) + Val(Data2) / 2) / 2000000
    Kc2 = 2 * Tension * Cos(Angle) / Ray2
    Kv2 = Ray2 * Ray2 / 8 / Viscosite
    Line Input #1, Data
    Prob2 = Val(Data)
    Line Input #1, Data2
    Line Input #1, Data1
    Ray3 = (Val(Data1) + Val(Data2) / 2) / 2000000
    Kc3 = 2 * Tension * Cos(Angle) / Ray3
    Kv3 = Ray3 * Ray3 / 8 / Viscosite
    Line Input #1, Data
    Prob3 = Val(Data)
    Line Input #1, Data2
    Line Input #1, Data1
    Ray4 = (Val(Data1) + Val(Data2) / 2) / 2000000
    Kc4 = 2 * Tension * Cos(Angle) / Ray4
    Kv4 = Ray4 * Ray4 / 8 / Viscosite
    Line Input #1, Data
    Prob4 = Val(Data)
    Line Input #1, Data2
    Line Input #1, Data1
    Ray5 = (Val(Data1) + Val(Data2) / 2) / 2000000
    Kc5 = 2 * Tension * Cos(Angle) / Ray5
    Kv5 = Ray5 * Ray5 / 8 / Viscosite
    Line Input #1, Data
    Prob5 = Val(Data)

```

```

Line Input #1, Data2
Line Input #1, Data1
Ray6 = (Val(Data1) + Val(Data2) / 2) / 2000000
Kc6 = 2 * Tension * Cos(Angle) / Ray6
Kv6 = Ray6 * Ray6 / 8 / Viscosite
Line Input #1, Data
Prob6 = Val(Data)
Line Input #1, Data2
Line Input #1, Data1
Ray7 = (Val(Data1) + Val(Data2) / 2) / 2000000
Kc7 = 2 * Tension * Cos(Angle) / Ray7
Kv7 = Ray7 * Ray7 / 8 / Viscosite
Line Input #1, Data
Prob7 = Val(Data)
Line Input #1, Data2
Line Input #1, Data1
Ray8 = (Val(Data1) + Val(Data2) / 2) / 2000000
Kc8 = 2 * Tension * Cos(Angle) / Ray8
Kv8 = Ray8 * Ray8 / 8 / Viscosite
Line Input #1, Data
Prob8 = Val(Data)
Line Input #1, Data2
Line Input #1, Data1
Ray9 = (Val(Data1) + Val(Data2) / 2) / 2000000
Kc9 = 2 * Tension * Cos(Angle) / Ray9
Kv9 = Ray9 * Ray9 / 8 / Viscosite
Line Input #1, Data
Prob9 = Val(Data)
Line Input #1, Data2
Line Input #1, Data1
Ray10 = (Val(Data1) + Val(Data2) / 2) / 2000000
Kc10 = 2 * Tension * Cos(Angle) / Ray10
Kv10 = Ray10 * Ray10 / 8 / Viscosite
Line Input #1, Data
Prob10 = Val(Data)
' Définition des couleurs selon la concentration
Color020 = &HFFC0FF
Color2040 = &HFF80FF
Color4060 = &HFF00FF
Color6080 = &HC000C0
Color80100 = &H800080
' Classification des cellules en couleurs
If Prob1 >= 0 And Prob1 < 0.2 Then Concentr(1) = 1
If (Prob1 + Prob2) >= 0 And (Prob1 + Prob2) < 0.2 Then Concentr(2) = 1
If (Prob1 + Prob2 + Prob3) >= 0 And (Prob1 + Prob2 + Prob3) < 0.2 Then Concentr(3) = 1
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4) >= 0 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4) < 0.2 Then Concentr(4) = 1
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5) >= 0 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5) < 0.2 Then Concentr(5) = 1
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6) >= 0 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6) < 0.2 Then
Concentr(6) = 1
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7) >= 0 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 +
Prob7) < 0.2 Then Concentr(7) = 1
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8) >= 0 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 +
Prob6 + Prob7 + Prob8) < 0.2 Then Concentr(8) = 1
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8 + Prob9) >= 0 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 +
Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8 + Prob9) < 0.2 Then Concentr(9) = 1
If Prob1 >= 0.2 And Prob1 < 0.4 Then Concentr(1) = 2
If (Prob1 + Prob2) >= 0.2 And (Prob1 + Prob2) < 0.4 Then Concentr(2) = 2
If (Prob1 + Prob2 + Prob3) >= 0.2 And (Prob1 + Prob2 + Prob3) < 0.4 Then Concentr(3) = 2
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4) >= 0.2 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4) < 0.4 Then Concentr(4) = 2
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5) >= 0.2 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5) < 0.4 Then Concentr(5) = 2
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6) >= 0.2 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6) < 0.4
Then Concentr(6) = 2
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7) >= 0.2 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 +
Prob7) < 0.4 Then Concentr(7) = 2
If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8) >= 0.2 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 +
Prob6 + Prob7 + Prob8) < 0.4 Then Concentr(8) = 2

```

```

    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8 + Prob9) >= 0.2 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8 + Prob9) < 0.4 Then Concentr(9) = 2
    If Prob1 >= 0.4 And Prob1 < 0.6 Then Concentr(1) = 3
    If (Prob1 + Prob2) >= 0.4 And (Prob1 + Prob2) < 0.6 Then Concentr(2) = 3
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3) >= 0.4 And (Prob1 + Prob2 + Prob3) < 0.6 Then Concentr(3) = 3
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4) >= 0.4 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4) < 0.6 Then Concentr(4) = 3
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5) >= 0.4 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5) < 0.6 Then Concentr(5) = 3
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6) >= 0.4 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6) < 0.6 Then Concentr(6) = 3
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7) >= 0.4 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7) < 0.6 Then Concentr(7) = 3
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8) >= 0.4 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8) < 0.6 Then Concentr(8) = 3
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8 + Prob9) >= 0.4 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8 + Prob9) < 0.6 Then Concentr(9) = 3
    If Prob1 >= 0.6 And Prob1 < 0.8 Then Concentr(1) = 4
    If (Prob1 + Prob2) >= 0.6 And (Prob1 + Prob2) < 0.8 Then Concentr(2) = 4
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3) >= 0.6 And (Prob1 + Prob2 + Prob3) < 0.8 Then Concentr(3) = 4
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4) >= 0.6 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4) < 0.8 Then Concentr(4) = 4
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5) >= 0.6 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5) < 0.8 Then Concentr(5) = 4
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6) >= 0.6 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6) < 0.8 Then Concentr(6) = 4
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7) >= 0.6 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7) < 0.8 Then Concentr(7) = 4
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8) >= 0.6 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8) < 0.8 Then Concentr(8) = 4
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8 + Prob9) >= 0.6 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8 + Prob9) < 0.8 Then Concentr(9) = 4
    If Prob1 >= 0.8 And Prob1 < 1 Then Concentr(1) = 5
    If (Prob1 + Prob2) >= 0.8 And (Prob1 + Prob2) < 1 Then Concentr(2) = 5
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3) >= 0.8 And (Prob1 + Prob2 + Prob3) < 1 Then Concentr(3) = 5
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4) >= 0.8 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4) < 1 Then Concentr(4) = 5
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5) >= 0.8 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5) < 1 Then Concentr(5) = 5
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6) >= 0.8 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6) < 1 Then Concentr(6) = 5
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7) >= 0.8 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7) < 1 Then Concentr(7) = 5
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8) >= 0.8 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8) < 1 Then Concentr(8) = 5
    If (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8 + Prob9) >= 0.8 And (Prob1 + Prob2 + Prob3 + Prob4 + Prob5 + Prob6 + Prob7 + Prob8 + Prob9) < 1 Then Concentr(9) = 5
    Concentr(10) = 5
End If
Line Input #1, Data
If Data = "Micro" Then
    Line Input #1, Data
    Dv = Val(Data)
    Line Input #1, Data
    Ds = Val(Data)
    Line Input #1, Data
    Porosite = Val(Data) / 100
    Eta = Dv + (Ds * Porosite)
Else
    Line Input #1, Data
    Eta = Val(Data)
End If
Close #1
' Affichage des cases bleues (métal)
For i = 1 To 4
    For j = 1 To 4
        If TablEchant(i, j) = " 2" Then
            If i > 1 Then
                If TablEchant(i - 1, j) = " 3" Then
                    CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) - PasCell
                    CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1))
                    NewX = CoordX + PasCell

```

```

NewY = CoordY + (NbCell * PasCell)
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(1), BF
Diff = -1
For k = j To 4
    If TablEchant(i - 1, k) = " 3" Then Diff = Diff + 1
Next k
For p = 1 To NbCell
    ' TablCell = 150 correspond à du métal pur
    TablCell1(i - 1, j, NbCell, p) = 150
    TablCell2(i - 1, j, NbCell, p) = 150
    TablCell3(i - 1, j, NbCell, p) = 150
    TablCell4(i - 1, j, NbCell, p) = 150
    TablCell5(i - 1, j, NbCell, p) = 150
    TablCell6(i - 1, j, NbCell, p) = 150
    TablCell7(i - 1, j, NbCell, p) = 150
    TablCell8(i - 1, j, NbCell, p) = 150
    TablCell9(i - 1, j, NbCell, p) = 150
    TablCell10(i - 1, j, NbCell, p) = 150
    If Front.Checked = True Then
        Pression = Kc + ((Hauteur - (Diff * CoteCarre + ((NbCell - p) / NbCell) * CoteCarre)) * Densite * 9.80665)
    Else
        Pression = ((Hauteur - (Diff * CoteCarre + ((NbCell - p) / NbCell) * CoteCarre)) * Densite * 9.80665)
    End If
    PressGauche(i, j, 1, p) = Pression
    Avancement(i, j, 1, p) = 1
    Avancement1(i, j, 1, p) = 1
    Avancement2(i, j, 1, p) = 1
    Avancement3(i, j, 1, p) = 1
    Avancement4(i, j, 1, p) = 1
    Avancement5(i, j, 1, p) = 1
    Avancement6(i, j, 1, p) = 1
    Avancement7(i, j, 1, p) = 1
    Avancement8(i, j, 1, p) = 1
    Avancement9(i, j, 1, p) = 1
    Avancement10(i, j, 1, p) = 1
Next p
End If
End If
If j > 1 Then
    If TablEchant(i, j - 1) = " 3" Then
        CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1))
        CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) - PasCell
        NewX = CoordX + (NbCell * PasCell)
        NewY = CoordY + PasCell
        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(1), BF
        For o = 1 To NbCell
            TablCell1(i, j - 1, o, NbCell) = 150
            TablCell2(i, j - 1, o, NbCell) = 150
            TablCell3(i, j - 1, o, NbCell) = 150
            TablCell4(i, j - 1, o, NbCell) = 150
            TablCell5(i, j - 1, o, NbCell) = 150
            TablCell6(i, j - 1, o, NbCell) = 150
            TablCell7(i, j - 1, o, NbCell) = 150
            TablCell8(i, j - 1, o, NbCell) = 150
            TablCell9(i, j - 1, o, NbCell) = 150
            TablCell10(i, j - 1, o, NbCell) = 150
            If Front.Checked = True Then
                Pression = Kc + Densite * 9.80665 * Hauteur
            Else
                Pression = Densite * 9.80665 * Hauteur
            End If
            PressHaut(i, j, o, 1) = Pression
            Avancement(i, j, o, 1) = 1
            Avancement1(i, j, o, 1) = 1
            Avancement2(i, j, o, 1) = 1
            Avancement3(i, j, o, 1) = 1
        Next o
    End If
End If

```

```

    Avancement4(i, j, o, 1) = 1
    Avancement5(i, j, o, 1) = 1
    Avancement6(i, j, o, 1) = 1
    Avancement7(i, j, o, 1) = 1
    Avancement8(i, j, o, 1) = 1
    Avancement9(i, j, o, 1) = 1
    Avancement10(i, j, o, 1) = 1
Next o
End If
End If
If i < 4 Then
    If TablEchant(i + 1, j) = " 3" Then
        CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * i)
        CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1))
        NewX = CoordX + PasCell
        NewY = CoordY + (PasCell * NbCell)
        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(1), BF
        Diff = -1
        For k = j To 4
            If TablEchant(i + 1, k) = " 3" Then Diff = Diff + 1
        Next k
        For p = 1 To NbCell
            TablCell1(i + 1, j, 1, p) = 150
            TablCell2(i + 1, j, 1, p) = 150
            TablCell3(i + 1, j, 1, p) = 150
            TablCell4(i + 1, j, 1, p) = 150
            TablCell5(i + 1, j, 1, p) = 150
            TablCell6(i + 1, j, 1, p) = 150
            TablCell7(i + 1, j, 1, p) = 150
            TablCell8(i + 1, j, 1, p) = 150
            TablCell9(i + 1, j, 1, p) = 150
            TablCell10(i + 1, j, 1, p) = 150
            If Front.Checked = True Then
                Pression = Kc + ((Hauteur - (Diff * CoteCarre + ((NbCell - p) / NbCell) * CoteCarre)) * Densite * 9.80665)
            Else
                Pression = ((Hauteur - (Diff * CoteCarre + ((NbCell - p) / NbCell) * CoteCarre)) * Densite * 9.80665)
            End If
            PressDroite(i, j, NbCell, p) = Pression
            Avancement1(i, j, NbCell, p) = 1
            Avancement2(i, j, NbCell, p) = 1
            Avancement3(i, j, NbCell, p) = 1
            Avancement4(i, j, NbCell, p) = 1
            Avancement5(i, j, NbCell, p) = 1
            Avancement6(i, j, NbCell, p) = 1
            Avancement7(i, j, NbCell, p) = 1
            Avancement8(i, j, NbCell, p) = 1
            Avancement9(i, j, NbCell, p) = 1
            Avancement10(i, j, NbCell, p) = 1
        Next p
    End If
End If
If j < 4 Then
    If TablEchant(i, j + 1) = " 3" Then
        CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1))
        CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * j)
        NewX = CoordX + (NbCell * PasCell)
        NewY = CoordY + PasCell
        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(1), BF
        For o = 1 To NbCell
            TablCell1(i, j + 1, o, 1) = 150
            TablCell2(i, j + 1, o, 1) = 150
            TablCell3(i, j + 1, o, 1) = 150
            TablCell4(i, j + 1, o, 1) = 150
            TablCell5(i, j + 1, o, 1) = 150
            TablCell6(i, j + 1, o, 1) = 150

```

```

    TablCell7(i, j + 1, o, 1) = 150
    TablCell8(i, j + 1, o, 1) = 150
    TablCell9(i, j + 1, o, 1) = 150
    TablCell10(i, j + 1, o, 1) = 150
    If Front.Checked = True Then
        Pression = Kc + Densite * 9.80665 * Hauteur
    Else
        Pression = Densite * 9.80665 * Hauteur
    End If
    PressBas(i, j, o, NbCell) = Pression
    Avancement(i, j, o, NbCell) = 1
    Avancement1(i, j, o, NbCell) = 1
    Avancement2(i, j, o, NbCell) = 1
    Avancement3(i, j, o, NbCell) = 1
    Avancement4(i, j, o, NbCell) = 1
    Avancement5(i, j, o, NbCell) = 1
    Avancement6(i, j, o, NbCell) = 1
    Avancement7(i, j, o, NbCell) = 1
    Avancement8(i, j, o, NbCell) = 1
    Avancement9(i, j, o, NbCell) = 1
    Avancement10(i, j, o, NbCell) = 1
Next o
End If
End If
End If
Next j
Next i
Bouton.Caption = "&Continuer la simulation"
Arreter.Enabled = True
Debut_Simul = False
End If

Fin:
End Sub

' Routine pour calculer le nouvel état du système en mode "Front"
Public Sub Calcul_Front()
' Rafraîchissement de l'affichage des cellules
    For i = 1 To 4
        For j = 1 To 4
            For o = 1 To NbCell
                For p = 1 To NbCell
                    If TablCell1(i, j, o, p) = 100 Then
                        CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
                        CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
                        NewX = CoordX + PasCell
                        NewY = CoordY + PasCell
                        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(13), BF
                    End If
                Next p
            Next o
        Next j
    Next i
    InstantInit = Instant
' Début de la grande boucle pour calculer le prochain état du système (Do... Loop Until...)
    Do
' La variable TInter détermine le temps minimum relatif nécessaire pour remplir la prochaine cellule
        TInter = Laps
        For i = 1 To 4
            For j = 1 To 4
                If TablEchant(i, j) = " 2" Then
                    For o = 1 To NbCell
                        For p = 1 To NbCell
' TablCell = 100 signifie que la cellule est déjà remplie
                            If TablCell1(i, j, o, p) = 100 Then GoTo Rien

```



```

    If PressGauche(i, j, o, p) > PressDroite(i, j, o, p) Then PressMax = PressGauche(i, j, o, p) Else PressMax =
PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressHaut(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressBas(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 And PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then
        'If PressDroite(i, j, o, p) = PressMax And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax And PressBas(i, j, o, p) = PressMax
Then GoTo Rien
        PressTotal = PressMax
        If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
        If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        a = Avancement(i, j, o, p)
        t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv / Eta / PressTotal * 3
        If TDebut(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut(i, j, o, p) - Instant
    End If
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then
        'If (PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Or PressDroite(i, j, o, p) = PressMax + Densite * 9.80665 * LongCell)
And (PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Or PressGauche(i, j, o, p) = PressMax + Densite * 9.80665 * LongCell) And (PressBas(i, j,
o, p) = PressMax Or PressBas(i, j, o, p) = PressMax + Densite * 9.80665 * LongCell) Then GoTo Rien
        PressTotal = PressMax
        If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
        If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        Kg = Densite * 9.80665
        a = Avancement(i, j, o, p)
        t = 1 / Kv / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a -
1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))) * 3
        If TDebut(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut(i, j, o, p) - Instant
    End If
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 And PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then
        'If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax And PressBas(i, j, o, p) = PressMax
Then GoTo Rien
        PressTotal = PressMax
        If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
        If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        a = Avancement(i, j, o, p)
        t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv / Eta / PressTotal * 3
        If TDebut(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut(i, j, o, p) - Instant
    End If
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
        'If (PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Or PressDroite(i, j, o, p) = PressMax - Densite * 9.80665 * LongCell) And
(PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Or PressHaut(i, j, o, p) = PressMax - Densite * 9.80665 * LongCell) And (PressGauche(i, j, o, p) =
PressMax Or PressGauche(i, j, o, p) = PressMax - Densite * 9.80665 * LongCell) Then GoTo Rien
        PressTotal = PressMax
        If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
        If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
        If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)

```

```

PressControl(i, j, o, p) = PressMax
Kg = -1 * Densite * 9.80665
a = Avancement(i, j, o, p)
If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
    t = 1 / Kv / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a
- 1)))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))) * 3
    If TDebut(i, j, o, p) = -1 Then
        TDebut(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
        If TDebut(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut(i, j, o, p) -
Instant
End If
End If
Rien:
    Next p
    Next o
    End If
    Next j
    Next i
' Le Tinter minimal ayant été trouvé, on passe au traitement de la cellule en question
Instant = Instant + TInter
For i = 1 To 4
    For j = 1 To 4
        If TablEchant(i, j) = " 2" Then
            For o = 1 To NbCell
                For p = 1 To NbCell
                    If TablCell1(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) =
PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo RAS
                ' La cellule est remplie et change de couleur
                If TDebut(i, j, o, p) = Instant Then
                    If TablCell1(i, j, o, p) <> 100 Then
                        TablCell1(i, j, o, p) = 100
                        CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
                        CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
                        NewX = CoordX + PasCell
                        NewY = CoordY + PasCell
                        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), QBColor(13), BF
                    End If
                    TDebut(i, j, o, p) = -1
                    PressMax = PressControl(i, j, o, p)
                ' Le programme va maintenant réactualiser les conditions aux limites de la cellules et de ses voisines
                If PressGauche(i, j, o, p) <> PressMax Then
                    If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
                    If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
                    If PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
                    If o > 1 Then
                        PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
                        If TablCell1(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement(i, j, o - 1, p) < Avancement(i, j, o, p) Then
Avancement(i, j, o - 1, p) = Avancement(i, j, o, p) + 1
                    Else
                        If i > 1 Then
                            If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
                                PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression
                                If TablCell1(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement(i, j, o, p)
Then Avancement(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement(i, j, o, p) + 1
                            End If
                        End If
                    End If
                    PressGauche(i, j, o, p) = Pression
                End If
                If PressHaut(i, j, o, p) <> PressMax Then
                    If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression
= PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
                    If p > 1 Then

```



```

    AffichInstant.Caption = Str(Round(Instant / 60, 2))
    UniteTemps.Caption = "minute(s)"
Else
    If Instant < 86400 Then
        AffichInstant.Caption = Str(Round(Instant / 3600, 2))
        UniteTemps.Caption = "heure(s)"
    Else
        AffichInstant.Caption = Str(Round(Instant / 86400, 2))
        UniteTemps.Caption = "jour(s)"
    End If
End If
End If
End If
PrecProfond = 0
Profond = 0
' Routine pour calculer la profondeur maximale d'infiltration
For i = 1 To 4
    For j = 1 To 4
        If TablEchant(i, j) = " 2" Then
            If i > 1 Then
                If TablEchant(i - 1, j) = " 3" Then
                    For p = 1 To NbCell
                        For o = 1 To NbCell
                            If TablCell1(i, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
                        Next o
                    Next p
                    If TablCell1(i, j, NbCell, p) <> 0 And i < 4 Then
                        For k = i + 1 To 4
                            If TablEchant(k, j) = " 2" Then
                                For o = 1 To NbCell
                                    If TablCell1(k, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
                                Next o
                            End If
                        Next k
                    End If
                    If Profond > PrecProfond Then PrecProfond = Profond
                    Profond = 0
                Next p
            End If
        End If
        If i < 4 Then
            If TablEchant(i + 1, j) = " 3" Then
                For p = 1 To NbCell
                    For o = NbCell To 1 Step -1
                        If TablCell1(i, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
                    Next o
                Next p
                If TablCell1(i, j, 1, p) <> 0 And i > 1 Then
                    For k = i - 1 To 1 Step -1
                        If TablEchant(k, j) = " 2" Then
                            For o = NbCell To 1 Step -1
                                If TablCell1(k, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
                            Next o
                        End If
                    Next k
                End If
                If Profond > PrecProfond Then PrecProfond = Profond
                Profond = 0
            Next p
        End If
    End If
    If j > 1 Then
        If TablEchant(i, j - 1) = " 3" Then
            For o = 1 To NbCell
                For p = 1 To NbCell
                    If TablCell1(i, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
                Next p
            Next o
            If TablCell1(i, j, o, NbCell) <> 0 And j < 4 Then
                For k = j + 1 To 4

```

```

        If TablEchant(i, k) = " 2" Then
            For p = 1 To NbCell
                If TablCell1(i, k, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
            Next p
        End If
    Next k
End If
If Profond > PrecProfond Then PrecProfond = Profond
Profond = 0
Next o
End If
End If
If j < 4 Then
    If TablEchant(i, j + 1) = " 3" Then
        For o = 1 To NbCell
            For p = NbCell To 1 Step -1
                If TablCell1(i, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
            Next p
            If TablCell1(i, j, o, 1) <> 0 And j > 1 Then
                For k = j - 1 To 1 Step -1
                    If TablEchant(i, k) = " 2" Then
                        For p = NbCell To 1 Step -1
                            If TablCell1(i, k, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
                        Next p
                    End If
                Next k
            End If
        Next o
    End If
    If Profond > PrecProfond Then PrecProfond = Profond
    Profond = 0
    Next o
End If
End If
Next j
Next i
' Affichage de la nouvelle profondeur d'infiltration
AffichProfond.Caption = Str(Round(PrecProfond, 2))
VoyantRouge.Visible = False
VoyantVert.Visible = True
VoyantText.Caption = "En attente..."
End Sub

' Routine pour calculer le nouvel état du système en mode "Concentration"
Public Sub Calcul_Concentration()
' Rafraichissement de l'affichage (réaffichage des cellules)
For i = 1 To 4
    For j = 1 To 4
        For o = 1 To NbCell
            For p = 1 To NbCell
                If TablCell1(i, j, o, p) = 100 Then
                    CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
                    CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
                    NewX = CoordX + PasCell
                    NewY = CoordY + PasCell
' La variable Concentr détermine l'état de la cellule selon la classification en couleurs
                    Select Case Concentr(1)
                        Case 1
                            Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
                        Case 2
                            Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
                        Case 3
                            Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
                        Case 4
                            Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
                        Case 5
                            Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
                    End Select
                End If
            Next p
        Next o
    Next j
Next i

```

```

End Select
End If
If TablCell2(i, j, o, p) = 100 Then
  CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
  CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
  NewX = CoordX + PasCell
  NewY = CoordY + PasCell
  Select Case Concentr(2)
    Case 1
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
    Case 2
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
    Case 3
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
    Case 4
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
    Case 5
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
  End Select
End If
If TablCell3(i, j, o, p) = 100 Then
  CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
  CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
  NewX = CoordX + PasCell
  NewY = CoordY + PasCell
  Select Case Concentr(3)
    Case 1
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
    Case 2
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
    Case 3
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
    Case 4
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
    Case 5
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
  End Select
End If
If TablCell4(i, j, o, p) = 100 Then
  CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
  CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
  NewX = CoordX + PasCell
  NewY = CoordY + PasCell
  Select Case Concentr(4)
    Case 1
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
    Case 2
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
    Case 3
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
    Case 4
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
    Case 5
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
  End Select
End If
If TablCell5(i, j, o, p) = 100 Then
  CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
  CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
  NewX = CoordX + PasCell
  NewY = CoordY + PasCell
  Select Case Concentr(5)
    Case 1
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
    Case 2
      Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF

```

```

Case 3
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
Case 4
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
Case 5
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
End Select
End If
If TablCell6(i, j, o, p) = 100 Then
CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
NewX = CoordX + PasCell
NewY = CoordY + PasCell
Select Case Concentr(6)
Case 1
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
Case 2
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
Case 3
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
Case 4
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
Case 5
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
End Select
End If
If TablCell7(i, j, o, p) = 100 Then
CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
NewX = CoordX + PasCell
NewY = CoordY + PasCell
Select Case Concentr(7)
Case 1
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
Case 2
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
Case 3
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
Case 4
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
Case 5
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
End Select
End If
If TablCell8(i, j, o, p) = 100 Then
CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
NewX = CoordX + PasCell
NewY = CoordY + PasCell
Select Case Concentr(8)
Case 1
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
Case 2
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
Case 3
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
Case 4
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
Case 5
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
End Select
End If
If TablCell9(i, j, o, p) = 100 Then
CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
NewX = CoordX + PasCell

```

```

NewY = CoordY + PasCell
Select Case Concentr(9)
  Case 1
    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
  Case 2
    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
  Case 3
    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
  Case 4
    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
  Case 5
    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
End Select
End If
If TablCell10(i, j, o, p) = 100 Then
  CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
  CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
  NewX = CoordX + PasCell
  NewY = CoordY + PasCell
  Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
End If
Next p
Next o
Next j
Next i
InstantInit = Instant
' Début de la grande boucle pour calculer le nouvel état du système
Do
  TInter = Laps
  ' Renvoi à la routine pour calculer le temps minimum relatif pour remplir la prochaine cellule
  Calcul_Concentration_Temps
  Instant = Instant + Tinter
  ' Renvoi à la routine pour effectuer le traitement de la cellule qui doit être remplie
  Calcul_Concentration_Limite
  Loop Until Instant >= (InstantInit + Laps)
  If Instant < 60 Then
    AffichInstant.Caption = Str(Round(Instant, 2))
    UniteTemps.Caption = "seconde(s)"
  Else
    If Instant < 3600 Then
      AffichInstant.Caption = Str(Round(Instant / 60, 2))
      UniteTemps.Caption = "minute(s)"
    Else
      If Instant < 86400 Then
        AffichInstant.Caption = Str(Round(Instant / 3600, 2))
        UniteTemps.Caption = "heure(s)"
      Else
        AffichInstant.Caption = Str(Round(Instant / 86400, 2))
        UniteTemps.Caption = "jour(s)"
      End If
    End If
  End If
End If
End If
PrecProfond = 0
Profond = 0
' Routine pour calculer la profondeur d'infiltration
For i = 1 To 4
  For j = 1 To 4
    If TablEchant(i, j) = " 2" Then
      If i > 1 Then
        If TablEchant(i - 1, j) = " 3" Then
          For p = 1 To NbCell
            For o = 1 To NbCell
              If TablCell11(i, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
            Next o
          Next p
          If TablCell11(i, j, NbCell, p) <> 0 And i < 4 Then
            For k = i + 1 To 4

```



```

        If TablEchant(k, j) = " 2" Then
            For o = 1 To NbCell
                If TablCell1(k, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
            Next o
        End If
    Next k
End If
If Profond > PrecProfond Then PrecProfond = Profond
Profond = 0
Next p
End If
End If
If i < 4 Then
    If TablEchant(i + 1, j) = " 3" Then
        For p = 1 To NbCell
            For o = NbCell To 1 Step -1
                If TablCell1(i, j, 1, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
            Next o
            If TablCell1(i, j, 1, p) <> 0 And i > 1 Then
                For k = i - 1 To 1 Step -1
                    If TablEchant(k, j) = " 2" Then
                        For o = NbCell To 1 Step -1
                            If TablCell1(k, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
                        Next o
                    End If
                Next k
            End If
        Next p
    End If
    If Profond > PrecProfond Then PrecProfond = Profond
    Profond = 0
    Next p
End If
End If
If j > 1 Then
    If TablEchant(i, j - 1) = " 3" Then
        For o = 1 To NbCell
            For p = 1 To NbCell
                If TablCell1(i, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
            Next p
            If TablCell1(i, j, o, NbCell) <> 0 And j < 4 Then
                For k = j + 1 To 4
                    If TablEchant(i, k) = " 2" Then
                        For p = 1 To NbCell
                            If TablCell1(i, k, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
                        Next p
                    End If
                Next k
            End If
        Next o
    End If
    If Profond > PrecProfond Then PrecProfond = Profond
    Profond = 0
    Next o
End If
End If
If j < 4 Then
    If TablEchant(i, j + 1) = " 3" Then
        For o = 1 To NbCell
            For p = NbCell To 1 Step -1
                If TablCell1(i, j, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
            Next p
            If TablCell1(i, j, o, 1) <> 0 And j > 1 Then
                For k = j - 1 To 1 Step -1
                    If TablEchant(i, k) = " 2" Then
                        For p = NbCell To 1 Step -1
                            If TablCell1(i, k, o, p) <> 0 Then Profond = Profond + (CoteCarre * 100 / NbCell)
                        Next p
                    End If
                Next k
            End If
        Next o
    End If
End If

```



```

If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
PressControl(i, j, o, p) = PressMax
a = Avancement1(i, j, o, p)
t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv1 / Eta / PressTotal * 3
If TDebut1(i, j, o, p) = -1 Then
    TDebut1(i, j, o, p) = Instant + t
Else
    If TDebut1(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut1(i, j, o, p) = Instant + t
End If
If TDebut1(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut1(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut1(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc1
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    Kg = -1 * Densite * 9.80665
    a = Avancement1(i, j, o, p)
    If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
        t = 1 / Kv1 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell *
(a - 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
        If TDebut1(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut1(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut1(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut1(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut1(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut1(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut1(i, j, o, p) -
Instant
    End If
End If
Cat2:
If TablCell2(i, j, o, p) = 100 Then GoTo Cat3
If PressGauche(i, j, o, p) > PressDroite(i, j, o, p) Then PressMax = PressGauche(i, j, o, p) Else PressMax =
PressDroite(i, j, o, p)
If PressHaut(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressHaut(i, j, o, p)
If PressBas(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressBas(i, j, o, p)
If PressGauche(i, j, o, p) > 0 And PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc2
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    a = Avancement2(i, j, o, p)
    t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv2 / Eta / PressTotal * 3
    If TDebut2(i, j, o, p) = -1 Then
        TDebut2(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
        If TDebut2(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut2(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut2(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut2(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut2(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressHaut(i, j, o, p) > 0 And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc2
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    Kg = Densite * 9.80665
    a = Avancement2(i, j, o, p)
    t = 1 / Kv2 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a
- 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3

```

```

If TDebut2(i, j, o, p) = -1 Then
  TDebut2(i, j, o, p) = Instant + t
Else
  If TDebut2(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut2(i, j, o, p) = Instant + t
End If
If TDebut2(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut2(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut2(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressDroite(i, j, o, p) > 0 And PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc2
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax
  a = Avancement2(i, j, o, p)
  t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv2 / Eta / PressTotal * 3
  If TDebut2(i, j, o, p) = -1 Then
    TDebut2(i, j, o, p) = Instant + t
  Else
    If TDebut2(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut2(i, j, o, p) = Instant + t
  End If
  If TDebut2(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut2(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut2(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc2
  If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax
  Kg = -1 * Densite * 9.80665
  a = Avancement2(i, j, o, p)
  If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
    t = 1 / Kv2 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell *
(a - 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
    If TDebut2(i, j, o, p) = -1 Then
      TDebut2(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
      If TDebut2(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut2(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut2(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut2(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut2(i, j, o, p) -
Instant
  End If
End If
Cat3:
If TablCell3(i, j, o, p) = 100 Then GoTo Cat4
If PressGauche(i, j, o, p) > PressDroite(i, j, o, p) Then PressMax = PressGauche(i, j, o, p) Else PressMax =
PressDroite(i, j, o, p)
If PressHaut(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressHaut(i, j, o, p)
If PressBas(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressBas(i, j, o, p)
If PressGauche(i, j, o, p) > 0 And PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc3
  If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax
  a = Avancement3(i, j, o, p)
  t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv3 / Eta / PressTotal * 3
  If TDebut3(i, j, o, p) = -1 Then
    TDebut3(i, j, o, p) = Instant + t
  Else
    If TDebut3(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut3(i, j, o, p) = Instant + t
  End If
  If TDebut3(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut3(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut3(i, j, o, p) -
Instant
End If

```

```

If PressHaut(i, j, o, p) > 0 And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc3
  If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax
  Kg = Densite * 9.80665
  a = Avancement3(i, j, o, p)
  t = 1 / Kv3 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a
- 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
  If TDebut3(i, j, o, p) = -1 Then
    TDebut3(i, j, o, p) = Instant + t
  Else
    If TDebut3(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut3(i, j, o, p) = Instant + t
  End If
  If TDebut3(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut3(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut3(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressDroite(i, j, o, p) > 0 And PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc3
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax
  a = Avancement3(i, j, o, p)
  t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv3 / Eta / PressTotal * 3
  If TDebut3(i, j, o, p) = -1 Then
    TDebut3(i, j, o, p) = Instant + t
  Else
    If TDebut3(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut3(i, j, o, p) = Instant + t
  End If
  If TDebut3(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut3(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut3(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc3
  If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax
  Kg = -1 * Densite * 9.80665
  a = Avancement3(i, j, o, p)
  If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
    t = 1 / Kv3 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell *
(a - 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
    If TDebut3(i, j, o, p) = -1 Then
      TDebut3(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
      If TDebut3(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut3(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut3(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut3(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut3(i, j, o, p) -
Instant
  End If
End If
Cat4:
If TablCell4(i, j, o, p) = 100 Then GoTo Cat5
If PressGauche(i, j, o, p) > PressDroite(i, j, o, p) Then PressMax = PressGauche(i, j, o, p) Else PressMax =
PressDroite(i, j, o, p)
If PressHaut(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressHaut(i, j, o, p)
If PressBas(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressBas(i, j, o, p)
If PressGauche(i, j, o, p) > 0 And PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc4
  If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax

```

```

a = Avancement4(i, j, o, p)
t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv4 / Eta / PressTotal * 3
If TDebut4(i, j, o, p) = -1 Then
    TDebut4(i, j, o, p) = Instant + t
Else
    If TDebut4(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut4(i, j, o, p) = Instant + t
End If
If TDebut4(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut4(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut4(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressHaut(i, j, o, p) > 0 And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc4
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    Kg = Densite * 9.80665
    a = Avancement4(i, j, o, p)
    t = 1 / Kv4 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a
- 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
    If TDebut4(i, j, o, p) = -1 Then
        TDebut4(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
        If TDebut4(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut4(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut4(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut4(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut4(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressDroite(i, j, o, p) > 0 And PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc4
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    a = Avancement4(i, j, o, p)
    t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv4 / Eta / PressTotal * 3
    If TDebut4(i, j, o, p) = -1 Then
        TDebut4(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
        If TDebut4(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut4(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut4(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut4(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut4(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc4
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    Kg = -1 * Densite * 9.80665
    a = Avancement4(i, j, o, p)
    If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
        t = 1 / Kv4 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell *
(a - 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
        If TDebut4(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut4(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut4(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut4(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut4(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut4(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut4(i, j, o, p) -
Instant
    End If
End If
End If
Cat5:
If TablCell5(i, j, o, p) = 100 Then GoTo Cat6

```

```

    If PressGauche(i, j, o, p) > PressDroite(i, j, o, p) Then PressMax = PressGauche(i, j, o, p) Else PressMax =
PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressHaut(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressBas(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 And PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then
        PressTotal = PressMax + Kc5
        If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
        If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        a = Avancement5(i, j, o, p)
        t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv5 / Eta / PressTotal * 3
        If TDebut5(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut5(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut5(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut5(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut5(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut5(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut5(i, j, o, p) -
Instant
    End If
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then
        PressTotal = PressMax + Kc5
        If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
        If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        Kg = Densite * 9.80665
        a = Avancement5(i, j, o, p)
        t = 1 / Kv5 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a
- 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
        If TDebut5(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut5(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut5(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut5(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut5(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut5(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut5(i, j, o, p) -
Instant
    End If
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 And PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then
        PressTotal = PressMax + Kc5
        If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
        If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        a = Avancement5(i, j, o, p)
        t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv5 / Eta / PressTotal * 3
        If TDebut5(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut5(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut5(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut5(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut5(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut5(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut5(i, j, o, p) -
Instant
    End If
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
        PressTotal = PressMax + Kc5
        If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
        If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
        If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        Kg = -1 * Densite * 9.80665
        a = Avancement5(i, j, o, p)
        If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
            t = 1 / Kv5 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell *
(a - 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
            If TDebut5(i, j, o, p) = -1 Then

```

```

        TDebut5(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
        If TDebut5(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut5(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut5(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut5(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut5(i, j, o, p) -
Instant
    End If
End If
Cat6:
    If TablCell6(i, j, o, p) = 100 Then GoTo Cat7
    If PressGauche(i, j, o, p) > PressDroite(i, j, o, p) Then PressMax = PressGauche(i, j, o, p) Else PressMax =
PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressHaut(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressBas(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 And PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then
        PressTotal = PressMax + Kc6
        If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
        If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        a = Avancement6(i, j, o, p)
        t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv6 / Eta / PressTotal * 3
        If TDebut6(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut6(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut6(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut6(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut6(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut6(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut6(i, j, o, p) -
Instant
    End If
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then
        PressTotal = PressMax + Kc6
        If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
        If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        Kg = Densite * 9.80665
        a = Avancement6(i, j, o, p)
        t = 1 / Kv6 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a
- 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
        If TDebut6(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut6(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut6(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut6(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut6(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut6(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut6(i, j, o, p) -
Instant
    End If
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 And PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then
        PressTotal = PressMax + Kc6
        If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
        If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        a = Avancement6(i, j, o, p)
        t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv6 / Eta / PressTotal * 3
        If TDebut6(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut6(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut6(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut6(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut6(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut6(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut6(i, j, o, p) -
Instant
    End If
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
        PressTotal = PressMax + Kc6

```



```

If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
PressControl(i, j, o, p) = PressMax
Kg = -1 * Densite * 9.80665
a = Avancement6(i, j, o, p)
If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
    t = 1 / Kv6 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell *
(a - 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
    If TDebut6(i, j, o, p) = -1 Then
        TDebut6(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
        If TDebut6(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut6(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut6(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut6(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut6(i, j, o, p) -
Instant
    End If
End If
Cat7:
If TablCell7(i, j, o, p) = 100 Then GoTo Cat8
If PressGauche(i, j, o, p) > PressDroite(i, j, o, p) Then PressMax = PressGauche(i, j, o, p) Else PressMax =
PressDroite(i, j, o, p)
If PressHaut(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressHaut(i, j, o, p)
If PressBas(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressBas(i, j, o, p)
If PressGauche(i, j, o, p) > 0 And PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc7
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    a = Avancement7(i, j, o, p)
    t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv7 / Eta / PressTotal * 3
    If TDebut7(i, j, o, p) = -1 Then
        TDebut7(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
        If TDebut7(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut7(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut7(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut7(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut7(i, j, o, p) -
Instant
    End If
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then
        PressTotal = PressMax + Kc7
        If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
        If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        Kg = Densite * 9.80665
        a = Avancement7(i, j, o, p)
        t = 1 / Kv7 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a
- 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
        If TDebut7(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut7(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut7(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut7(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut7(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut7(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut7(i, j, o, p) -
Instant
    End If
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 And PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then
        PressTotal = PressMax + Kc7
        If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
        If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
        If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
        PressControl(i, j, o, p) = PressMax
        a = Avancement7(i, j, o, p)
        t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv7 / Eta / PressTotal * 3

```

```

    If TDebut7(i, j, o, p) = -1 Then
      TDebut7(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
      If TDebut7(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut7(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut7(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut7(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut7(i, j, o, p) -
Instant
  End If
  If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc7
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    Kg = -1 * Densite * 9.80665
    a = Avancement7(i, j, o, p)
    If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
      t = 1 / Kv7 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell *
(a - 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
      If TDebut7(i, j, o, p) = -1 Then
        TDebut7(i, j, o, p) = Instant + t
      Else
        If TDebut7(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut7(i, j, o, p) = Instant + t
      End If
      If TDebut7(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut7(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut7(i, j, o, p) -
Instant
    End If
  End If
Cat8:
  If TablCell8(i, j, o, p) = 100 Then GoTo Cat9
  If PressGauche(i, j, o, p) > PressDroite(i, j, o, p) Then PressMax = PressGauche(i, j, o, p) Else PressMax =
PressDroite(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressHaut(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressBas(i, j, o, p)
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 And PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc8
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    a = Avancement8(i, j, o, p)
    t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv8 / Eta / PressTotal * 3
    If TDebut8(i, j, o, p) = -1 Then
      TDebut8(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
      If TDebut8(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut8(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut8(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut8(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut8(i, j, o, p) -
Instant
  End If
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc8
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    Kg = Densite * 9.80665
    a = Avancement8(i, j, o, p)
    t = 1 / Kv8 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a
- 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
    If TDebut8(i, j, o, p) = -1 Then
      TDebut8(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
      If TDebut8(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut8(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
  End If

```

```

Instant      If TDebut8(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut8(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut8(i, j, o, p) -
End If
If PressDroite(i, j, o, p) > 0 And PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc8
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax
  a = Avancement8(i, j, o, p)
  t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv8 / Eta / PressTotal * 3
  If TDebut8(i, j, o, p) = -1 Then
    TDebut8(i, j, o, p) = Instant + t
  Else
    If TDebut8(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut8(i, j, o, p) = Instant + t
  End If
  If TDebut8(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut8(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut8(i, j, o, p) -
Instant      End If
If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc8
  If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax
  Kg = -1 * Densite * 9.80665
  a = Avancement8(i, j, o, p)
  If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
    t = 1 / Kv8 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell *
(a - 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
    If TDebut8(i, j, o, p) = -1 Then
      TDebut8(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
      If TDebut8(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut8(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut8(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut8(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut8(i, j, o, p) -
Instant      End If
End If
Cat9:
If TablCell9(i, j, o, p) = 100 Then GoTo Cat10
  If PressGauche(i, j, o, p) > PressDroite(i, j, o, p) Then PressMax = PressGauche(i, j, o, p) Else PressMax =
PressDroite(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressHaut(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressBas(i, j, o, p)
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 And PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc9
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    a = Avancement9(i, j, o, p)
    t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv9 / Eta / PressTotal * 3
    If TDebut9(i, j, o, p) = -1 Then
      TDebut9(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
      If TDebut9(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut9(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut9(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut9(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut9(i, j, o, p) -
Instant      End If
If PressHaut(i, j, o, p) > 0 And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc9
  If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)

```

```

PressControl(i, j, o, p) = PressMax
Kg = Densite * 9.80665
a = Avancement9(i, j, o, p)
t = 1 / Kv9 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a
- 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
If TDebut9(i, j, o, p) = -1 Then
  TDebut9(i, j, o, p) = Instant + t
Else
  If TDebut9(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut9(i, j, o, p) = Instant + t
End If
If TDebut9(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut9(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut9(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressDroite(i, j, o, p) > 0 And PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc9
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax
  a = Avancement9(i, j, o, p)
  t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv9 / Eta / PressTotal * 3
  If TDebut9(i, j, o, p) = -1 Then
    TDebut9(i, j, o, p) = Instant + t
  Else
    If TDebut9(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut9(i, j, o, p) = Instant + t
  End If
  If TDebut9(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut9(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut9(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
  PressTotal = PressMax + Kc9
  If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
  PressControl(i, j, o, p) = PressMax
  Kg = -1 * Densite * 9.80665
  a = Avancement9(i, j, o, p)
  If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
    t = 1 / Kv9 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell *
(a - 1))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))))) * 3
    If TDebut9(i, j, o, p) = -1 Then
      TDebut9(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
      If TDebut9(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut9(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut9(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut9(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut9(i, j, o, p) -
Instant
  End If
End If
Cat10:
If TablCell10(i, j, o, p) = 100 Then GoTo Nada
  If PressGauche(i, j, o, p) > PressDroite(i, j, o, p) Then PressMax = PressGauche(i, j, o, p) Else PressMax =
PressDroite(i, j, o, p)
  If PressHaut(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressHaut(i, j, o, p)
  If PressBas(i, j, o, p) > PressMax Then PressMax = PressBas(i, j, o, p)
  If PressGauche(i, j, o, p) > 0 And PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc10
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    a = Avancement10(i, j, o, p)
    t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv10 / Eta / PressTotal * 3
    If TDebut10(i, j, o, p) = -1 Then
      TDebut10(i, j, o, p) = Instant + t
    Else

```

```

        If TDebut10(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut10(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut10(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut10(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut10(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressHaut(i, j, o, p) > 0 And PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc10
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    Kg = Densite * 9.80665
    a = Avancement10(i, j, o, p)
    t = 1 / Kv10 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * (a
- 1)))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))) * 3
    If TDebut10(i, j, o, p) = -1 Then
        TDebut10(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
        If TDebut10(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut10(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut10(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut10(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut10(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressDroite(i, j, o, p) > 0 And PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc10
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressBas(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressBas(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    a = Avancement10(i, j, o, p)
    t = LongCell * LongCell * ((a * a) - ((a - 1) * (a - 1))) / 2 / Kv10 / Eta / PressTotal * 3
    If TDebut10(i, j, o, p) = -1 Then
        TDebut10(i, j, o, p) = Instant + t
    Else
        If TDebut10(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut10(i, j, o, p) = Instant + t
    End If
    If TDebut10(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut10(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut10(i, j, o, p) -
Instant
End If
If PressBas(i, j, o, p) > 0 And PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then
    PressTotal = PressMax + Kc10
    If PressDroite(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressDroite(i, j, o, p)
    If PressHaut(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressHaut(i, j, o, p)
    If PressGauche(i, j, o, p) > 0 Then PressTotal = PressTotal + PressGauche(i, j, o, p)
    PressControl(i, j, o, p) = PressMax
    Kg = -1 * Densite * 9.80665
    a = Avancement10(i, j, o, p)
    If LongCell < (-1 * PressTotal * Eta / Kg / a) Then
        t = 1 / Kv10 / Kg / Kg * ((Kg * LongCell) + ((PressTotal * Eta) * Log(((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell *
(a - 1)))) / ((PressTotal * Eta) + (Kg * LongCell * a)))) * 3
        If TDebut10(i, j, o, p) = -1 Then
            TDebut10(i, j, o, p) = Instant + t
        Else
            If TDebut10(i, j, o, p) > (Instant + t) Then TDebut10(i, j, o, p) = Instant + t
        End If
        If TDebut10(i, j, o, p) < (Instant + TInter) And TDebut10(i, j, o, p) > Instant Then TInter = TDebut10(i, j, o,
p) - Instant
    End If
End If
End If
Nada:
    Next p
    Next o
    End If
    Next j
    Next i
End Sub

```

```

' Routine pour effectuer le traitement de la cellule qui doit être remplie
Public Sub Calcul_Concentration_Limite()
    For i = 1 To 4
        For j = 1 To 4
            If TablEchant(i, j) = " 2" Then
                For o = 1 To NbCell
                    For p = 1 To NbCell
                        If TablCell1(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) = PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo Lim2
                    ' La cellule change d'état et change de couleur
                        If TDebut1(i, j, o, p) = Instant Then
                            If TablCell1(i, j, o, p) <> 100 Then
                                TablCell1(i, j, o, p) = 100
                                CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
                                CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
                                NewX = CoordX + PasCell
                                NewY = CoordY + PasCell
                                Select Case Concentr(1)
                                    Case 1
                                        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
                                    Case 2
                                        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
                                    Case 3
                                        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
                                    Case 4
                                        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
                                    Case 5
                                        Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
                                End Select
                            End If
                            TDebut1(i, j, o, p) = -1
                        ' Réactualisation des conditions aux limites
                            PressMax = PressControl(i, j, o, p)
                        ' Les fonctions Limite_Press...(...) permettent de calculer les nouvelles conditions aux limites
                            Call Limite_PressGauche(1)
                            Call Limite_PressHaut(1)
                            If PressDroite(i, j, o, p) <> PressMax Then
                                If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
                                If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
                                If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
                            End If
                            If o < NbCell Then
                                PressGauche(i, j, o + 1, p) = Pression
                                If TablCell1(i, j, o + 1, p) <> 100 And Avancement1(i, j, o + 1, p) < Avancement1(i, j, o, p) Then
                                    Avancement1(i, j, o + 1, p) = Avancement1(i, j, o, p) + 1
                                    Avancement2(i, j, o + 1, p) = Avancement2(i, j, o, p)
                                    Avancement3(i, j, o + 1, p) = Avancement3(i, j, o, p)
                                    Avancement4(i, j, o + 1, p) = Avancement4(i, j, o, p)
                                    Avancement5(i, j, o + 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
                                    Avancement6(i, j, o + 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
                                    Avancement7(i, j, o + 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
                                    Avancement8(i, j, o + 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
                                    Avancement9(i, j, o + 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                                    Avancement10(i, j, o + 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
                                End If
                            Else
                                If i < 4 Then
                                    If TablEchant(i + 1, j) = " 2" Then
                                        PressGauche(i + 1, j, 1, p) = Pression
                                        If TablCell1(i + 1, j, 1, p) <> 100 And Avancement1(i + 1, j, 1, p) < Avancement1(i, j, o, p) Then
                                            Avancement1(i + 1, j, 1, p) = Avancement1(i, j, o, p) + 1
                                            Avancement2(i + 1, j, 1, p) = Avancement2(i, j, o, p)
                                            Avancement3(i + 1, j, 1, p) = Avancement3(i, j, o, p)
                                            Avancement4(i + 1, j, 1, p) = Avancement4(i, j, o, p)
                                            Avancement5(i + 1, j, 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
                                            Avancement6(i + 1, j, 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
                                        End If
                                    End If
                                End If
                            End If
                    End For
                End For
            End If
        End For
    End For
End Sub

```

```

    Avancement7(i + 1, j, 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
    Avancement8(i + 1, j, 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
    Avancement9(i + 1, j, 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
    Avancement10(i + 1, j, 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
  End If
End If
End If
End If
PressDroite(i, j, o, p) = Pression
End If
If PressBas(i, j, o, p) <> PressMax Then
  If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression
= PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
  If p < NbCell Then
    PressHaut(i, j, o, p + 1) = Pression
    If TablCell1(i, j, o, p + 1) <> 100 And Avancement1(i, j, o, p + 1) < Avancement1(i, j, o, p) Then
      Avancement1(i, j, o, p + 1) = Avancement1(i, j, o, p) + 1
      Avancement2(i, j, o, p + 1) = Avancement2(i, j, o, p)
      Avancement3(i, j, o, p + 1) = Avancement3(i, j, o, p)
      Avancement4(i, j, o, p + 1) = Avancement4(i, j, o, p)
      Avancement5(i, j, o, p + 1) = Avancement5(i, j, o, p)
      Avancement6(i, j, o, p + 1) = Avancement6(i, j, o, p)
      Avancement7(i, j, o, p + 1) = Avancement7(i, j, o, p)
      Avancement8(i, j, o, p + 1) = Avancement8(i, j, o, p)
      Avancement9(i, j, o, p + 1) = Avancement9(i, j, o, p)
      Avancement10(i, j, o, p + 1) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
  Else
    If j < 4 Then
      If TablEchant(i, j + 1) = " 2" Then
        PressHaut(i, j + 1, o, 1) = Pression
        If TablCell1(i, j + 1, o, 1) <> 100 And Avancement1(i, j + 1, o, 1) < Avancement1(i, j, o, p) Then
          Avancement1(i, j + 1, o, 1) = Avancement1(i, j, o, p) + 1
          Avancement2(i, j + 1, o, 1) = Avancement2(i, j, o, p)
          Avancement3(i, j + 1, o, 1) = Avancement3(i, j, o, p)
          Avancement4(i, j + 1, o, 1) = Avancement4(i, j, o, p)
          Avancement5(i, j + 1, o, 1) = Avancement5(i, j, o, p)
          Avancement6(i, j + 1, o, 1) = Avancement6(i, j, o, p)
          Avancement7(i, j + 1, o, 1) = Avancement7(i, j, o, p)
          Avancement8(i, j + 1, o, 1) = Avancement8(i, j, o, p)
          Avancement9(i, j + 1, o, 1) = Avancement9(i, j, o, p)
          Avancement10(i, j + 1, o, 1) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
      End If
    End If
  End If
  PressBas(i, j, o, p) = Pression
End If
End If

Lim2:
  If TablCell2(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) =
PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo Lim3
  If TDebut2(i, j, o, p) = Instant Then
    If TablCell2(i, j, o, p) <> 100 Then
      TablCell2(i, j, o, p) = 100
      CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
      CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
      NewX = CoordX + PasCell
      NewY = CoordY + PasCell
      Select Case Concentr(2)
        Case 1
          Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
        Case 2
          Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
        Case 3
          Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
      End Select
    End If
  End If
End If

```

```

Case 4
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
Case 5
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
End Select
End If
TDebut2(i, j, o, p) = -1
PressMax = PressControl(i, j, o, p)
Call Limite_PressGauche(2)
Call Limite_PressHaut(2)
If PressDroite(i, j, o, p) <> PressMax Then
If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
If o < NbCell Then
PressGauche(i, j, o + 1, p) = Pression
If TablCell2(i, j, o + 1, p) <> 100 And Avancement2(i, j, o + 1, p) < Avancement2(i, j, o, p) Then
Avancement2(i, j, o + 1, p) = Avancement2(i, j, o, p) + 1
Avancement3(i, j, o + 1, p) = Avancement3(i, j, o, p)
Avancement4(i, j, o + 1, p) = Avancement4(i, j, o, p)
Avancement5(i, j, o + 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
Avancement6(i, j, o + 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
Avancement7(i, j, o + 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
Avancement8(i, j, o + 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
Avancement9(i, j, o + 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
Avancement10(i, j, o + 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
Else
If i < 4 Then
If TablEchant(i + 1, j) = " 2" Then
PressGauche(i + 1, j, 1, p) = Pression
If TablCell2(i + 1, j, 1, p) <> 100 And Avancement2(i + 1, j, 1, p) < Avancement2(i, j, o, p) Then
Avancement2(i + 1, j, 1, p) = Avancement2(i, j, o, p) + 1
Avancement3(i + 1, j, 1, p) = Avancement3(i, j, o, p)
Avancement4(i + 1, j, 1, p) = Avancement4(i, j, o, p)
Avancement5(i + 1, j, 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
Avancement6(i + 1, j, 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
Avancement7(i + 1, j, 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
Avancement8(i + 1, j, 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
Avancement9(i + 1, j, 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
Avancement10(i + 1, j, 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
End If
End If
End If
PressDroite(i, j, o, p) = Pression
End If
If PressBas(i, j, o, p) <> PressMax Then
If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression
= PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
If p < NbCell Then
PressHaut(i, j, o, p + 1) = Pression
If TablCell2(i, j, o, p + 1) <> 100 And Avancement2(i, j, o, p + 1) < Avancement2(i, j, o, p) Then
Avancement2(i, j, o, p + 1) = Avancement2(i, j, o, p) + 1
Avancement3(i, j, o, p + 1) = Avancement3(i, j, o, p)
Avancement4(i, j, o, p + 1) = Avancement4(i, j, o, p)
Avancement5(i, j, o, p + 1) = Avancement5(i, j, o, p)
Avancement6(i, j, o, p + 1) = Avancement6(i, j, o, p)
Avancement7(i, j, o, p + 1) = Avancement7(i, j, o, p)
Avancement8(i, j, o, p + 1) = Avancement8(i, j, o, p)
Avancement9(i, j, o, p + 1) = Avancement9(i, j, o, p)
Avancement10(i, j, o, p + 1) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
Else
If j < 4 Then
If TablEchant(i, j + 1) = " 2" Then

```



```

PressHaut(i, j + 1, o, 1) = Pression
If TablCell2(i, j + 1, o, 1) <> 100 And Avancement2(i, j + 1, o, 1) < Avancement2(i, j, o, p) Then
    Avancement2(i, j + 1, o, 1) = Avancement2(i, j, o, p) + 1
    Avancement3(i, j + 1, o, 1) = Avancement3(i, j, o, p)
    Avancement4(i, j + 1, o, 1) = Avancement4(i, j, o, p)
    Avancement5(i, j + 1, o, 1) = Avancement5(i, j, o, p)
    Avancement6(i, j + 1, o, 1) = Avancement6(i, j, o, p)
    Avancement7(i, j + 1, o, 1) = Avancement7(i, j, o, p)
    Avancement8(i, j + 1, o, 1) = Avancement8(i, j, o, p)
    Avancement9(i, j + 1, o, 1) = Avancement9(i, j, o, p)
    Avancement10(i, j + 1, o, 1) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
End If
End If
End If
PressBas(i, j, o, p) = Pression
End If
End If
Lim3:
If TablCell3(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) =
PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo Lim4
If TDebut3(i, j, o, p) = Instant Then
    If TablCell3(i, j, o, p) <> 100 Then
        TablCell3(i, j, o, p) = 100
        CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
        CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
        NewX = CoordX + PasCell
        NewY = CoordY + PasCell
        Select Case Concentr(3)
            Case 1
                Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
            Case 2
                Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
            Case 3
                Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
            Case 4
                Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
            Case 5
                Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
        End Select
    End If
    TDebut3(i, j, o, p) = -1
    PressMax = PressControl(i, j, o, p)
    Call Limite_PressGauche(3)
    Call Limite_PressHaut(3)
    If PressDroite(i, j, o, p) <> PressMax Then
        If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
        If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
        If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
    End If
    If o < NbCell Then
        PressGauche(i, j, o + 1, p) = Pression
        If TablCell3(i, j, o + 1, p) <> 100 And Avancement3(i, j, o + 1, p) < Avancement3(i, j, o, p) Then
            Avancement3(i, j, o + 1, p) = Avancement3(i, j, o, p) + 1
            Avancement4(i, j, o + 1, p) = Avancement4(i, j, o, p)
            Avancement5(i, j, o + 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
            Avancement6(i, j, o + 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
            Avancement7(i, j, o + 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
            Avancement8(i, j, o + 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
            Avancement9(i, j, o + 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
            Avancement10(i, j, o + 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
    Else
        If i < 4 Then
            If TablEchant(i + 1, j) = " 2" Then
                PressGauche(i + 1, j, 1, p) = Pression
                If TablCell3(i + 1, j, 1, p) <> 100 And Avancement3(i + 1, j, 1, p) < Avancement3(i, j, o, p) Then

```

```

Avancement3(i + 1, j, 1, p) = Avancement3(i, j, o, p) + 1
Avancement4(i + 1, j, 1, p) = Avancement4(i, j, o, p)
Avancement5(i + 1, j, 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
Avancement6(i + 1, j, 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
Avancement7(i + 1, j, 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
Avancement8(i + 1, j, 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
Avancement9(i + 1, j, 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
Avancement10(i + 1, j, 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
End If
End If
End If
PressDroite(i, j, o, p) = Pression
End If
If PressBas(i, j, o, p) <> PressMax Then
    If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression
= PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
    If p < NbCell Then
        PressHaut(i, j, o, p + 1) = Pression
        If TablCell3(i, j, o, p + 1) <> 100 And Avancement3(i, j, o, p + 1) < Avancement3(i, j, o, p) Then
            Avancement3(i, j, o, p + 1) = Avancement3(i, j, o, p) + 1
            Avancement4(i, j, o, p + 1) = Avancement4(i, j, o, p)
            Avancement5(i, j, o, p + 1) = Avancement5(i, j, o, p)
            Avancement6(i, j, o, p + 1) = Avancement6(i, j, o, p)
            Avancement7(i, j, o, p + 1) = Avancement7(i, j, o, p)
            Avancement8(i, j, o, p + 1) = Avancement8(i, j, o, p)
            Avancement9(i, j, o, p + 1) = Avancement9(i, j, o, p)
            Avancement10(i, j, o, p + 1) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
    Else
        If j < 4 Then
            If TablEchant(i, j + 1) = " 2" Then
                PressHaut(i, j + 1, o, 1) = Pression
                If TablCell3(i, j + 1, o, 1) <> 100 And Avancement3(i, j + 1, o, 1) < Avancement3(i, j, o, p) Then
                    Avancement3(i, j + 1, o, 1) = Avancement3(i, j, o, p) + 1
                    Avancement4(i, j + 1, o, 1) = Avancement4(i, j, o, p)
                    Avancement5(i, j + 1, o, 1) = Avancement5(i, j, o, p)
                    Avancement6(i, j + 1, o, 1) = Avancement6(i, j, o, p)
                    Avancement7(i, j + 1, o, 1) = Avancement7(i, j, o, p)
                    Avancement8(i, j + 1, o, 1) = Avancement8(i, j, o, p)
                    Avancement9(i, j + 1, o, 1) = Avancement9(i, j, o, p)
                    Avancement10(i, j + 1, o, 1) = Avancement10(i, j, o, p)
                End If
            End If
        End If
    End If
    PressBas(i, j, o, p) = Pression
End If
End If
Lim4:
    If TablCell4(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) =
PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo Lim5
    If TDebut4(i, j, o, p) = Instant Then
        If TablCell4(i, j, o, p) <> 100 Then
            TablCell4(i, j, o, p) = 100
            CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
            CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
            NewX = CoordX + PasCell
            NewY = CoordY + PasCell
            Select Case Concentr(4)
                Case 1
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
                Case 2
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
                Case 3
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
            End Select
        End If
    End If
End If

```

```

Case 4
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
Case 5
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
End Select
End If
TDebut4(i, j, o, p) = -1
PressMax = PressControl(i, j, o, p)
Call Limite_PressGauche(4)
Call Limite_PressHaut(4)
If PressDroite(i, j, o, p) <> PressMax Then
  If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
  If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
  If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
  If o < NbCell Then
    PressGauche(i, j, o + 1, p) = Pression
    If TablCell4(i, j, o + 1, p) <> 100 And Avancement4(i, j, o + 1, p) < Avancement4(i, j, o, p) Then
      Avancement4(i, j, o + 1, p) = Avancement4(i, j, o, p) + 1
      Avancement5(i, j, o + 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
      Avancement6(i, j, o + 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
      Avancement7(i, j, o + 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
      Avancement8(i, j, o + 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
      Avancement9(i, j, o + 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
      Avancement10(i, j, o + 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
  Else
    If i < 4 Then
      If TablEchant(i + 1, j) = " 2" Then
        PressGauche(i + 1, j, 1, p) = Pression
        If TablCell4(i + 1, j, 1, p) <> 100 And Avancement4(i + 1, j, 1, p) < Avancement4(i, j, o, p) Then
          Avancement4(i + 1, j, 1, p) = Avancement4(i, j, o, p) + 1
          Avancement5(i + 1, j, 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
          Avancement6(i + 1, j, 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
          Avancement7(i + 1, j, 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
          Avancement8(i + 1, j, 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
          Avancement9(i + 1, j, 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
          Avancement10(i + 1, j, 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
      End If
    End If
  End If
  PressDroite(i, j, o, p) = Pression
End If
If PressBas(i, j, o, p) <> PressMax Then
  If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression
= PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
  If p < NbCell Then
    PressHaut(i, j, o, p + 1) = Pression
    If TablCell4(i, j, o, p + 1) <> 100 And Avancement4(i, j, o, p + 1) < Avancement4(i, j, o, p) Then
      Avancement4(i, j, o, p + 1) = Avancement4(i, j, o, p) + 1
      Avancement5(i, j, o, p + 1) = Avancement5(i, j, o, p)
      Avancement6(i, j, o, p + 1) = Avancement6(i, j, o, p)
      Avancement7(i, j, o, p + 1) = Avancement7(i, j, o, p)
      Avancement8(i, j, o, p + 1) = Avancement8(i, j, o, p)
      Avancement9(i, j, o, p + 1) = Avancement9(i, j, o, p)
      Avancement10(i, j, o, p + 1) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
  Else
    If j < 4 Then
      If TablEchant(i, j + 1) = " 2" Then
        PressHaut(i, j + 1, o, 1) = Pression
        If TablCell4(i, j + 1, o, 1) <> 100 And Avancement4(i, j + 1, o, 1) < Avancement4(i, j, o, p) Then
          Avancement4(i, j + 1, o, 1) = Avancement4(i, j, o, p) + 1
          Avancement5(i, j + 1, o, 1) = Avancement5(i, j, o, p)
          Avancement6(i, j + 1, o, 1) = Avancement6(i, j, o, p)
          Avancement7(i, j + 1, o, 1) = Avancement7(i, j, o, p)
        End If
      End If
    End If
  End If
End If

```

```

        Avancement8(i, j + 1, o, 1) = Avancement8(i, j, o, p)
        Avancement9(i, j + 1, o, 1) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j + 1, o, 1) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
End If
End If
End If
PressBas(i, j, o, p) = Pression
End If
End If

Lim5:
    If TablCell5(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) =
    PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo Lim6
    If TDebut5(i, j, o, p) = Instant Then
        If TablCell5(i, j, o, p) <> 100 Then
            TablCell5(i, j, o, p) = 100
            CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
            CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
            NewX = CoordX + PasCell
            NewY = CoordY + PasCell
            Select Case Concentr(5)
                Case 1
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
                Case 2
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
                Case 3
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
                Case 4
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
                Case 5
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
            End Select
        End If
        TDebut5(i, j, o, p) = -1
        PressMax = PressControl(i, j, o, p)
        Call Limite_PressGauche(5)
        Call Limite_PressHaut(5)
        If PressDroite(i, j, o, p) <> PressMax Then
            If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
            If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
            If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
        End If
        If o < NbCell Then
            PressGauche(i, j, o + 1, p) = Pression
            If TablCell5(i, j, o + 1, p) <> 100 And Avancement5(i, j, o + 1, p) < Avancement5(i, j, o, p) Then
                Avancement5(i, j, o + 1, p) = Avancement5(i, j, o, p) + 1
                Avancement6(i, j, o + 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
                Avancement7(i, j, o + 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
                Avancement8(i, j, o + 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i, j, o + 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i, j, o + 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        Else
            If i < 4 Then
                If TablEchant(i + 1, j) = " 2" Then
                    PressGauche(i + 1, j, 1, p) = Pression
                    If TablCell5(i + 1, j, 1, p) <> 100 And Avancement5(i + 1, j, 1, p) < Avancement5(i, j, o, p) Then
                        Avancement5(i + 1, j, 1, p) = Avancement5(i, j, o, p) + 1
                        Avancement6(i + 1, j, 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
                        Avancement7(i + 1, j, 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
                        Avancement8(i + 1, j, 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
                        Avancement9(i + 1, j, 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                        Avancement10(i + 1, j, 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
                    End If
                End If
            End If
        End If
    End If

```

```

PressDroite(i, j, o, p) = Pression
End If
If PressBas(i, j, o, p) <> PressMax Then
    If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression
= PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
    If p < NbCell Then
        PressHaut(i, j, o, p + 1) = Pression
        If TablCell5(i, j, o, p + 1) <> 100 And Avancement5(i, j, o, p + 1) < Avancement5(i, j, o, p) Then
            Avancement5(i, j, o, p + 1) = Avancement5(i, j, o, p) + 1
            Avancement6(i, j, o, p + 1) = Avancement6(i, j, o, p)
            Avancement7(i, j, o, p + 1) = Avancement7(i, j, o, p)
            Avancement8(i, j, o, p + 1) = Avancement8(i, j, o, p)
            Avancement9(i, j, o, p + 1) = Avancement9(i, j, o, p)
            Avancement10(i, j, o, p + 1) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
    Else
        If j < 4 Then
            If TablEchant(i, j + 1) = " 2" Then
                PressHaut(i, j + 1, o, 1) = Pression
                If TablCell5(i, j + 1, o, 1) <> 100 And Avancement5(i, j + 1, o, 1) < Avancement5(i, j, o, p) Then
                    Avancement5(i, j + 1, o, 1) = Avancement5(i, j, o, p) + 1
                    Avancement6(i, j + 1, o, 1) = Avancement6(i, j, o, p)
                    Avancement7(i, j + 1, o, 1) = Avancement7(i, j, o, p)
                    Avancement8(i, j + 1, o, 1) = Avancement8(i, j, o, p)
                    Avancement9(i, j + 1, o, 1) = Avancement9(i, j, o, p)
                    Avancement10(i, j + 1, o, 1) = Avancement10(i, j, o, p)
                End If
            End If
        End If
    End If
    PressBas(i, j, o, p) = Pression
End If
End If
Lim6:
    If TablCell6(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) =
PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo Lim7
    If TDebut6(i, j, o, p) = Instant Then
        If TablCell6(i, j, o, p) <> 100 Then
            TablCell6(i, j, o, p) = 100
            CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
            CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
            NewX = CoordX + PasCell
            NewY = CoordY + PasCell
            Select Case Concentr(6)
                Case 1
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
                Case 2
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
                Case 3
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
                Case 4
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
                Case 5
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
            End Select
        End If
        TDebut6(i, j, o, p) = -1
        PressMax = PressControl(i, j, o, p)
        Call Limite_PressGauche(6)
        Call Limite_PressHaut(6)
        If PressDroite(i, j, o, p) <> PressMax Then
            If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
            If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
            If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
        End If
        If o < NbCell Then
            PressGauche(i, j, o + 1, p) = Pression
        End If
    End If

```

```

If TablCell6(i, j, o + 1, p) <> 100 And Avancement6(i, j, o + 1, p) < Avancement6(i, j, o, p) Then
  Avancement6(i, j, o + 1, p) = Avancement6(i, j, o, p) + 1
  Avancement7(i, j, o + 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
  Avancement8(i, j, o + 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
  Avancement9(i, j, o + 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
  Avancement10(i, j, o + 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
Else
  If i < 4 Then
    If TablEchant(i + 1, j) = " 2" Then
      PressGauche(i + 1, j, 1, p) = Pression
      If TablCell6(i + 1, j, 1, p) <> 100 And Avancement6(i + 1, j, 1, p) < Avancement6(i, j, o, p) Then
        Avancement6(i + 1, j, 1, p) = Avancement6(i, j, o, p) + 1
        Avancement7(i + 1, j, 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
        Avancement8(i + 1, j, 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
        Avancement9(i + 1, j, 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i + 1, j, 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
      End If
    End If
  End If
  PressDroite(i, j, o, p) = Pression
End If
If PressBas(i, j, o, p) <> PressMax Then
  If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression
= PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
  If p < NbCell Then
    PressHaut(i, j, o, p + 1) = Pression
    If TablCell6(i, j, o, p + 1) <> 100 And Avancement6(i, j, o, p + 1) < Avancement6(i, j, o, p) Then
      Avancement6(i, j, o, p + 1) = Avancement6(i, j, o, p) + 1
      Avancement7(i, j, o, p + 1) = Avancement7(i, j, o, p)
      Avancement8(i, j, o, p + 1) = Avancement8(i, j, o, p)
      Avancement9(i, j, o, p + 1) = Avancement9(i, j, o, p)
      Avancement10(i, j, o, p + 1) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
  End If
Else
  If j < 4 Then
    If TablEchant(i, j + 1) = " 2" Then
      PressHaut(i, j + 1, o, 1) = Pression
      If TablCell6(i, j + 1, o, 1) <> 100 And Avancement6(i, j + 1, o, 1) < Avancement6(i, j, o, p) Then
        Avancement6(i, j + 1, o, 1) = Avancement6(i, j, o, p) + 1
        Avancement7(i, j + 1, o, 1) = Avancement7(i, j, o, p)
        Avancement8(i, j + 1, o, 1) = Avancement8(i, j, o, p)
        Avancement9(i, j + 1, o, 1) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j + 1, o, 1) = Avancement10(i, j, o, p)
      End If
    End If
  End If
  PressBas(i, j, o, p) = Pression
End If
End If
Lim7:
  If TablCell7(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) =
PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo Lim8
  If TDebut7(i, j, o, p) = Instant Then
    If TablCell7(i, j, o, p) <> 100 Then
      TablCell7(i, j, o, p) = 100
      CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
      CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
      NewX = CoordX + PasCell
      NewY = CoordY + PasCell
      Select Case Concentr(7)
        Case 1
          Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
        Case 2

```

```

Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
Case 3
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
Case 4
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
Case 5
Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
End Select
End If
TDebut7(i, j, o, p) = -1
PressMax = PressControl(i, j, o, p)
Call Limite_PressGauche(7)
Call Limite_PressHaut(7)
If PressDroite(i, j, o, p) <> PressMax Then
If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
If o < NbCell Then
PressGauche(i, j, o + 1, p) = Pression
If TablCell7(i, j, o + 1, p) <> 100 And Avancement7(i, j, o + 1, p) < Avancement7(i, j, o, p) Then
Avancement7(i, j, o + 1, p) = Avancement7(i, j, o, p) + 1
Avancement8(i, j, o + 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
Avancement9(i, j, o + 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
Avancement10(i, j, o + 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
Else
If i < 4 Then
If TablEchant(i + 1, j) = " 2" Then
PressGauche(i + 1, j, 1, p) = Pression
If TablCell7(i + 1, j, 1, p) <> 100 And Avancement7(i + 1, j, 1, p) < Avancement7(i, j, o, p) Then
Avancement7(i + 1, j, 1, p) = Avancement7(i, j, o, p) + 1
Avancement8(i + 1, j, 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
Avancement9(i + 1, j, 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
Avancement10(i + 1, j, 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
End If
End If
End If
PressDroite(i, j, o, p) = Pression
End If
If PressBas(i, j, o, p) <> PressMax Then
If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression
= PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
If p < NbCell Then
PressHaut(i, j, o, p + 1) = Pression
If TablCell7(i, j, o, p + 1) <> 100 And Avancement7(i, j, o, p + 1) < Avancement7(i, j, o, p) Then
Avancement7(i, j, o, p + 1) = Avancement7(i, j, o, p) + 1
Avancement8(i, j, o, p + 1) = Avancement8(i, j, o, p)
Avancement9(i, j, o, p + 1) = Avancement9(i, j, o, p)
Avancement10(i, j, o, p + 1) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
Else
If j < 4 Then
If TablEchant(i, j + 1) = " 2" Then
PressHaut(i, j + 1, o, 1) = Pression
If TablCell7(i, j + 1, o, 1) <> 100 And Avancement7(i, j + 1, o, 1) < Avancement7(i, j, o, p) Then
Avancement7(i, j + 1, o, 1) = Avancement7(i, j, o, p) + 1
Avancement8(i, j + 1, o, 1) = Avancement8(i, j, o, p)
Avancement9(i, j + 1, o, 1) = Avancement9(i, j, o, p)
Avancement10(i, j + 1, o, 1) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
End If
End If
End If
PressBas(i, j, o, p) = Pression
End If

```

```

End If
Lim8:
    If TablCell8(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) = PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo Lim9
    If TDebut8(i, j, o, p) = Instant Then
        If TablCell8(i, j, o, p) <> 100 Then
            TablCell8(i, j, o, p) = 100
            CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
            CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
            NewX = CoordX + PasCell
            NewY = CoordY + PasCell
            Select Case Concentr(8)
                Case 1
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
                Case 2
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
                Case 3
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
                Case 4
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
                Case 5
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
            End Select
        End If
        TDebut8(i, j, o, p) = -1
        PressMax = PressControl(i, j, o, p)
        Call Limite_PressGauche(8)
        Call Limite_PressHaut(8)
        If PressDroite(i, j, o, p) <> PressMax Then
            If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
            If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
            If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
            If o < NbCell Then
                PressGauche(i, j, o + 1, p) = Pression
                If TablCell8(i, j, o + 1, p) <> 100 And Avancement8(i, j, o + 1, p) < Avancement8(i, j, o, p) Then
                    Avancement8(i, j, o + 1, p) = Avancement8(i, j, o, p) + 1
                    Avancement9(i, j, o + 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                    Avancement10(i, j, o + 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
                End If
            End If
        Else
            If i < 4 Then
                If TablEchant(i + 1, j) = " 2" Then
                    PressGauche(i + 1, j, 1, p) = Pression
                    If TablCell8(i + 1, j, 1, p) <> 100 And Avancement8(i + 1, j, 1, p) < Avancement8(i, j, o, p) Then
                        Avancement8(i + 1, j, 1, p) = Avancement8(i, j, o, p) + 1
                        Avancement9(i + 1, j, 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                        Avancement10(i + 1, j, 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
                    End If
                End If
            End If
        End If
        PressDroite(i, j, o, p) = Pression
    End If
    If PressBas(i, j, o, p) <> PressMax Then
        If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
        If p < NbCell Then
            PressHaut(i, j, o, p + 1) = Pression
            If TablCell8(i, j, o, p + 1) <> 100 And Avancement8(i, j, o, p + 1) < Avancement8(i, j, o, p) Then
                Avancement8(i, j, o, p + 1) = Avancement8(i, j, o, p) + 1
                Avancement9(i, j, o, p + 1) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i, j, o, p + 1) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    Else
        If j < 4 Then
            If TablEchant(i, j + 1) = " 2" Then

```



```

        PressHaut(i, j + 1, o, 1) = Pression
        If TablCell8(i, j + 1, o, 1) <> 100 And Avancement8(i, j + 1, o, 1) < Avancement8(i, j, o, p) Then
            Avancement8(i, j + 1, o, 1) = Avancement8(i, j, o, p) + 1
            Avancement9(i, j + 1, o, 1) = Avancement9(i, j, o, p)
            Avancement10(i, j + 1, o, 1) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
    End If
End If
End If
PressBas(i, j, o, p) = Pression
End If
End If

Lim9:
    If TablCell9(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) =
    PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo Lim10
    If TDebut9(i, j, o, p) = Instant Then
        If TablCell9(i, j, o, p) <> 100 Then
            TablCell9(i, j, o, p) = 100
            CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
            CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
            NewX = CoordX + PasCell
            NewY = CoordY + PasCell
            Select Case Concentr(9)
                Case 1
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color020, BF
                Case 2
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color2040, BF
                Case 3
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color4060, BF
                Case 4
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color6080, BF
                Case 5
                    Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
            End Select
        End If
        TDebut9(i, j, o, p) = -1
        PressMax = PressControl(i, j, o, p)
        Call Limite_PressGauche(9)
        Call Limite_PressHaut(9)
        If PressDroite(i, j, o, p) <> PressMax Then
            If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
            If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
            If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
        End If
        If o < NbCell Then
            PressGauche(i, j, o + 1, p) = Pression
            If TablCell9(i, j, o + 1, p) <> 100 And Avancement9(i, j, o + 1, p) < Avancement9(i, j, o, p) Then
                Avancement9(i, j, o + 1, p) = Avancement9(i, j, o, p) + 1
                Avancement10(i, j, o + 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        Else
            If i < 4 Then
                If TablEchant(i + 1, j) = " 2" Then
                    PressGauche(i + 1, j, 1, p) = Pression
                    If TablCell9(i + 1, j, 1, p) <> 100 And Avancement9(i + 1, j, 1, p) < Avancement9(i, j, o, p) Then
                        Avancement9(i + 1, j, 1, p) = Avancement9(i, j, o, p) + 1
                        Avancement10(i + 1, j, 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
                    End If
                End If
            End If
        End If
        PressDroite(i, j, o, p) = Pression
    End If
    If PressBas(i, j, o, p) <> PressMax Then
        If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression
        = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
        If p < NbCell Then

```

```

PressHaut(i, j, o, p + 1) = Pression
If TablCell9(i, j, o, p + 1) <> 100 And Avancement9(i, j, o, p + 1) < Avancement9(i, j, o, p) Then
    Avancement9(i, j, o, p + 1) = Avancement9(i, j, o, p) + 1
    Avancement10(i, j, o, p + 1) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
Else
    If j < 4 Then
        If TablEchant(i, j + 1) = " 2" Then
            PressHaut(i, j + 1, o, 1) = Pression
            If TablCell9(i, j + 1, o, 1) <> 100 And Avancement9(i, j + 1, o, 1) < Avancement9(i, j, o, p) Then
                Avancement9(i, j + 1, o, 1) = Avancement9(i, j, o, p) + 1
                Avancement10(i, j + 1, o, 1) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
    End If
    PressBas(i, j, o, p) = Pression
End If
End If

Lim10:
    If TablCell10(i, j, o, p) = 100 And PressGauche(i, j, o, p) = PressHaut(i, j, o, p) And PressHaut(i, j, o, p) =
    PressDroite(i, j, o, p) And PressDroite(i, j, o, p) = PressBas(i, j, o, p) Then GoTo LimRAS
    If TDebut10(i, j, o, p) = Instant Then
        If TablCell10(i, j, o, p) <> 100 Then
            TablCell10(i, j, o, p) = 100
            CoordX = 5280 + (PasCell * NbCell * (i - 1)) + PasCell * (o - 1)
            CoordY = 600 + (PasCell * NbCell * (j - 1)) + PasCell * (p - 1)
            NewX = CoordX + PasCell
            NewY = CoordY + PasCell
            Line (CoordX, CoordY)-(NewX, NewY), Color80100, BF
        End If
        TDebut10(i, j, o, p) = -1
        PressMax = PressControl(i, j, o, p)
        Call Limite_PressGauche(10)
        Call Limite_PressHaut(10)
        If PressDroite(i, j, o, p) <> PressMax Then
            If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
            If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
            If PressGauche(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
        End If
        If o < NbCell Then
            PressGauche(i, j, o + 1, p) = Pression
            If TablCell10(i, j, o + 1, p) <> 100 And Avancement10(i, j, o + 1, p) < Avancement10(i, j, o, p) Then
                Avancement10(i, j, o + 1, p) = Avancement10(i, j, o, p) + 1
            End If
        End If
    Else
        If i < 4 Then
            If TablEchant(i + 1, j) = " 2" Then
                PressGauche(i + 1, j, 1, p) = Pression
                If TablCell10(i + 1, j, 1, p) <> 100 And Avancement10(i + 1, j, 1, p) < Avancement10(i, j, o, p) Then
                    Avancement10(i + 1, j, 1, p) = Avancement10(i, j, o, p) + 1
                End If
            End If
        End If
    End If
    PressDroite(i, j, o, p) = Pression
End If
End If
If PressBas(i, j, o, p) <> PressMax Then
    If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression
    = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
    If p < NbCell Then
        PressHaut(i, j, o, p + 1) = Pression
        If TablCell10(i, j, o, p + 1) <> 100 And Avancement10(i, j, o, p + 1) < Avancement10(i, j, o, p) Then
            Avancement10(i, j, o, p + 1) = Avancement10(i, j, o, p) + 1
        End If
    End If
Else
    If j < 4 Then

```

```

        If TablEchant(i, j + 1) = " 2" Then
            PressHaut(i, j + 1, o, 1) = Pression
            If TablCell10(i, j + 1, o, 1) <> 100 And Avancement10(i, j + 1, o, 1) < Avancement10(i, j, o, p) Then
                Avancement10(i, j + 1, o, 1) = Avancement10(i, j, o, p) + 1
            End If
        End If
    End If
End If
    PressBas(i, j, o, p) = Pression
End If
End If
LimRAS:
    Next p
    Next o
End If
    Next j
    Next i
End Sub

Public Sub Limite_PressGauche(Niveau As Byte)
If PressGauche(i, j, o, p) <> PressMax Then
    If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
    If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
    If PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
    Select Case Niveau
        Case 1
            If o > 1 Then
                PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
                If TablCell1(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement1(i, j, o - 1, p) < Avancement1(i, j, o, p) Then
                    Avancement1(i, j, o - 1, p) = Avancement1(i, j, o, p) + 1
                    Avancement2(i, j, o - 1, p) = Avancement2(i, j, o, p)
                    Avancement3(i, j, o - 1, p) = Avancement3(i, j, o, p)
                    Avancement4(i, j, o - 1, p) = Avancement4(i, j, o, p)
                    Avancement5(i, j, o - 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
                    Avancement6(i, j, o - 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
                    Avancement7(i, j, o - 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
                    Avancement8(i, j, o - 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
                    Avancement9(i, j, o - 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                    Avancement10(i, j, o - 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
                End If
            Else
                If i > 1 Then
                    If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
                        PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression
                        If TablCell11(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement1(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement1(i, j, o, p) Then
                            Avancement1(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement1(i, j, o, p) + 1
                            Avancement2(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement2(i, j, o, p)
                            Avancement3(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement3(i, j, o, p)
                            Avancement4(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement4(i, j, o, p)
                            Avancement5(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement5(i, j, o, p)
                            Avancement6(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement6(i, j, o, p)
                            Avancement7(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement7(i, j, o, p)
                            Avancement8(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement8(i, j, o, p)
                            Avancement9(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                            Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement10(i, j, o, p)
                        End If
                    End If
                End If
            End If
        Case 2
            If o > 1 Then
                PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
                If TablCell2(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement2(i, j, o - 1, p) < Avancement2(i, j, o, p) Then
                    Avancement2(i, j, o - 1, p) = Avancement2(i, j, o, p) + 1
                    Avancement3(i, j, o - 1, p) = Avancement3(i, j, o, p)
                    Avancement4(i, j, o - 1, p) = Avancement4(i, j, o, p)
                End If
            End If
        End If
    End Select
End Sub

```

```

    Avancement5(i, j, o - 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
    Avancement6(i, j, o - 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
    Avancement7(i, j, o - 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
    Avancement8(i, j, o - 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
    Avancement9(i, j, o - 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
    Avancement10(i, j, o - 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
Else
    If i > 1 Then
        If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
            PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression
            If TablCell2(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement2(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement2(i, j, o, p)
Then
                Avancement2(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement2(i, j, o, p) + 1
                Avancement3(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement3(i, j, o, p)
                Avancement4(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement4(i, j, o, p)
                Avancement5(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement5(i, j, o, p)
                Avancement6(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement6(i, j, o, p)
                Avancement7(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement7(i, j, o, p)
                Avancement8(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If
Case 3
    If o > 1 Then
        PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
        If TablCell3(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement3(i, j, o - 1, p) < Avancement3(i, j, o, p) Then
            Avancement3(i, j, o - 1, p) = Avancement3(i, j, o, p) + 1
            Avancement4(i, j, o - 1, p) = Avancement4(i, j, o, p)
            Avancement5(i, j, o - 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
            Avancement6(i, j, o - 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
            Avancement7(i, j, o - 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
            Avancement8(i, j, o - 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
            Avancement9(i, j, o - 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
            Avancement10(i, j, o - 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
    Else
        If i > 1 Then
            If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
                PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression
                If TablCell3(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement3(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement3(i, j, o, p)
Then
                    Avancement3(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement3(i, j, o, p) + 1
                    Avancement4(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement4(i, j, o, p)
                    Avancement5(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement5(i, j, o, p)
                    Avancement6(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement6(i, j, o, p)
                    Avancement7(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement7(i, j, o, p)
                    Avancement8(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement8(i, j, o, p)
                    Avancement9(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                    Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement10(i, j, o, p)
                End If
            End If
        End If
    End If
Case 4
    If o > 1 Then
        PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
        If TablCell4(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement4(i, j, o - 1, p) < Avancement4(i, j, o, p) Then
            Avancement4(i, j, o - 1, p) = Avancement4(i, j, o, p) + 1
            Avancement5(i, j, o - 1, p) = Avancement5(i, j, o, p)
            Avancement6(i, j, o - 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
            Avancement7(i, j, o - 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
            Avancement8(i, j, o - 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)

```

```

    Avancement9(i, j, o - 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
    Avancement10(i, j, o - 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
Else
    If i > 1 Then
        If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
            PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression
            If TablCell4(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement4(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement4(i, j, o, p)
Then
                Avancement4(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement4(i, j, o, p) + 1
                Avancement5(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement5(i, j, o, p)
                Avancement6(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement6(i, j, o, p)
                Avancement7(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement7(i, j, o, p)
                Avancement8(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If
Case 5
    If o > 1 Then
        PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
        If TablCell5(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement5(i, j, o - 1, p) < Avancement5(i, j, o, p) Then
            Avancement5(i, j, o - 1, p) = Avancement5(i, j, o, p) + 1
            Avancement6(i, j, o - 1, p) = Avancement6(i, j, o, p)
            Avancement7(i, j, o - 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
            Avancement8(i, j, o - 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
            Avancement9(i, j, o - 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
            Avancement10(i, j, o - 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
    Else
        If i > 1 Then
            If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
                PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression
                If TablCell5(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement5(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement5(i, j, o, p)
Then
                    Avancement5(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement5(i, j, o, p) + 1
                    Avancement6(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement6(i, j, o, p)
                    Avancement7(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement7(i, j, o, p)
                    Avancement8(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement8(i, j, o, p)
                    Avancement9(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                    Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement10(i, j, o, p)
                End If
            End If
        End If
    End If
Case 6
    If o > 1 Then
        PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
        If TablCell6(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement6(i, j, o - 1, p) < Avancement6(i, j, o, p) Then
            Avancement6(i, j, o - 1, p) = Avancement6(i, j, o, p) + 1
            Avancement7(i, j, o - 1, p) = Avancement7(i, j, o, p)
            Avancement8(i, j, o - 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
            Avancement9(i, j, o - 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
            Avancement10(i, j, o - 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
    Else
        If i > 1 Then
            If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
                PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression
                If TablCell6(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement6(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement6(i, j, o, p)
Then
                    Avancement6(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement6(i, j, o, p) + 1
                    Avancement7(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement7(i, j, o, p)
                    Avancement8(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement8(i, j, o, p)

```

```

        Avancement9(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
End If
End If
End If

Case 7
If o > 1 Then
    PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
    If TablCell7(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement7(i, j, o - 1, p) < Avancement7(i, j, o, p) Then
        Avancement7(i, j, o - 1, p) = Avancement7(i, j, o, p) + 1
        Avancement8(i, j, o - 1, p) = Avancement8(i, j, o, p)
        Avancement9(i, j, o - 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j, o - 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
Else
    If i > 1 Then
        If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
            PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression
            If TablCell7(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement7(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement7(i, j, o, p)
Then
                Avancement7(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement7(i, j, o, p) + 1
                Avancement8(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If

Case 8
If o > 1 Then
    PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
    If TablCell8(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement8(i, j, o - 1, p) < Avancement8(i, j, o, p) Then
        Avancement8(i, j, o - 1, p) = Avancement8(i, j, o, p) + 1
        Avancement9(i, j, o - 1, p) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j, o - 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
Else
    If i > 1 Then
        If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
            PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression
            If TablCell8(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement8(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement8(i, j, o, p)
Then
                Avancement8(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement8(i, j, o, p) + 1
                Avancement9(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If

Case 9
If PressGauche(i, j, o, p) <> PressMax Then
    If PressHaut(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax + (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
    If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
    If PressDroite(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax
    If o > 1 Then
        PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
        If TablCell9(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement9(i, j, o - 1, p) < Avancement9(i, j, o, p) Then
            Avancement9(i, j, o - 1, p) = Avancement9(i, j, o, p) + 1
            Avancement10(i, j, o - 1, p) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
    End If
Else
    If i > 1 Then
        If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
            PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression

```

```

    If TablCell9(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement9(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement9(i, j, o, p)
Then
    Avancement9(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement9(i, j, o, p) + 1
    Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
    End If
    End If
    End If
    PressGauche(i, j, o, p) = Pression
    End If
Case 10
If o > 1 Then
    PressDroite(i, j, o - 1, p) = Pression
    If TablCell10(i, j, o - 1, p) <> 100 And Avancement10(i, j, o - 1, p) < Avancement10(i, j, o, p) Then
        Avancement10(i, j, o - 1, p) = Avancement10(i, j, o, p) + 1
    End If
    Else
    If i > 1 Then
    If TablEchant(i - 1, j) = " 2" Then
        PressDroite(i - 1, j, NbCell, p) = Pression
        If TablCell10(i - 1, j, NbCell, p) <> 100 And Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) < Avancement10(i, j,
o, p) Then
            Avancement10(i - 1, j, NbCell, p) = Avancement10(i, j, o, p) + 1
        End If
    End If
    End If
    End If
    End Select
    PressGauche(i, j, o, p) = Pression
End If
End Sub

Public Sub Limite_PressHaut(Niveau As Byte)
If PressHaut(i, j, o, p) <> PressMax Then
    If PressBas(i, j, o, p) = PressMax Then Pression = PressMax - (Densite * 9.80665 * LongCell) Else Pression = PressMax -
(Densite * 9.80665 * LongCell / 2)
    Select Case Niveau
        Case 1
        If p > 1 Then
            PressBas(i, j, o, p - 1) = Pression
            If TablCell1(i, j, o, p - 1) <> 100 And Avancement1(i, j, o, p - 1) < Avancement1(i, j, o, p) Then
                Avancement1(i, j, o, p - 1) = Avancement1(i, j, o, p) + 1
                Avancement2(i, j, o, p - 1) = Avancement2(i, j, o, p)
                Avancement3(i, j, o, p - 1) = Avancement3(i, j, o, p)
                Avancement4(i, j, o, p - 1) = Avancement4(i, j, o, p)
                Avancement5(i, j, o, p - 1) = Avancement5(i, j, o, p)
                Avancement6(i, j, o, p - 1) = Avancement6(i, j, o, p)
                Avancement7(i, j, o, p - 1) = Avancement7(i, j, o, p)
                Avancement8(i, j, o, p - 1) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i, j, o, p - 1) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i, j, o, p - 1) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        Else
        If j > 1 Then
        If TablEchant(i, j - 1) = " 2" Then
            PressBas(i, j - 1, o, NbCell) = Pression
            If TablCell1(i, j - 1, o, NbCell) <> 100 And Avancement1(i, j - 1, o, NbCell) < Avancement1(i, j, o, p)
Then
                Avancement1(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement1(i, j, o, p) + 1
                Avancement2(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement2(i, j, o, p)
                Avancement3(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement3(i, j, o, p)
                Avancement4(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement4(i, j, o, p)
                Avancement5(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement5(i, j, o, p)
                Avancement6(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement6(i, j, o, p)
                Avancement7(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement7(i, j, o, p)
                Avancement8(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement8(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End Select
End If

```

```

        Avancement9(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
End If
End If
End If
Case 2
If p > 1 Then
    PressBas(i, j, o, p - 1) = Pression
    If TablCell2(i, j, o, p - 1) <> 100 And Avancement2(i, j, o, p - 1) < Avancement2(i, j, o, p) Then
        Avancement2(i, j, o, p - 1) = Avancement2(i, j, o, p) + 1
        Avancement3(i, j, o, p - 1) = Avancement3(i, j, o, p)
        Avancement4(i, j, o, p - 1) = Avancement4(i, j, o, p)
        Avancement5(i, j, o, p - 1) = Avancement5(i, j, o, p)
        Avancement6(i, j, o, p - 1) = Avancement6(i, j, o, p)
        Avancement7(i, j, o, p - 1) = Avancement7(i, j, o, p)
        Avancement8(i, j, o, p - 1) = Avancement8(i, j, o, p)
        Avancement9(i, j, o, p - 1) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j, o, p - 1) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
Else
    If j > 1 Then
        If TablEchant(i, j - 1) = " 2" Then
            PressBas(i, j - 1, o, NbCell) = Pression
            If TablCell2(i, j - 1, o, NbCell) <> 100 And Avancement2(i, j - 1, o, NbCell) < Avancement2(i, j, o, p)
Then
                Avancement2(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement2(i, j, o, p) + 1
                Avancement3(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement3(i, j, o, p)
                Avancement4(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement4(i, j, o, p)
                Avancement5(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement5(i, j, o, p)
                Avancement6(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement6(i, j, o, p)
                Avancement7(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement7(i, j, o, p)
                Avancement8(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If
Case 3
If p > 1 Then
    PressBas(i, j, o, p - 1) = Pression
    If TablCell3(i, j, o, p - 1) <> 100 And Avancement3(i, j, o, p - 1) < Avancement3(i, j, o, p) Then
        Avancement3(i, j, o, p - 1) = Avancement3(i, j, o, p) + 1
        Avancement4(i, j, o, p - 1) = Avancement4(i, j, o, p)
        Avancement5(i, j, o, p - 1) = Avancement5(i, j, o, p)
        Avancement6(i, j, o, p - 1) = Avancement6(i, j, o, p)
        Avancement7(i, j, o, p - 1) = Avancement7(i, j, o, p)
        Avancement8(i, j, o, p - 1) = Avancement8(i, j, o, p)
        Avancement9(i, j, o, p - 1) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j, o, p - 1) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
Else
    If j > 1 Then
        If TablEchant(i, j - 1) = " 2" Then
            PressBas(i, j - 1, o, NbCell) = Pression
            If TablCell3(i, j - 1, o, NbCell) <> 100 And Avancement3(i, j - 1, o, NbCell) < Avancement3(i, j, o, p)
Then
                Avancement3(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement3(i, j, o, p) + 1
                Avancement4(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement4(i, j, o, p)
                Avancement5(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement5(i, j, o, p)
                Avancement6(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement6(i, j, o, p)
                Avancement7(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement7(i, j, o, p)
                Avancement8(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If

```



```

        End If
    End If
End If

Case 4
If p > 1 Then
    PressBas(i, j, o, p - 1) = Pression
    If TablCell4(i, j, o, p - 1) <> 100 And Avancement4(i, j, o, p - 1) < Avancement4(i, j, o, p) Then
        Avancement4(i, j, o, p - 1) = Avancement4(i, j, o, p) + 1
        Avancement5(i, j, o, p - 1) = Avancement5(i, j, o, p)
        Avancement6(i, j, o, p - 1) = Avancement6(i, j, o, p)
        Avancement7(i, j, o, p - 1) = Avancement7(i, j, o, p)
        Avancement8(i, j, o, p - 1) = Avancement8(i, j, o, p)
        Avancement9(i, j, o, p - 1) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j, o, p - 1) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
Else
    If j > 1 Then
        If TablEchant(i, j - 1) = " 2" Then
            PressBas(i, j - 1, o, NbCell) = Pression
            If TablCell4(i, j - 1, o, NbCell) <> 100 And Avancement4(i, j - 1, o, NbCell) < Avancement4(i, j, o, p)
Then
                Avancement4(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement4(i, j, o, p) + 1
                Avancement5(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement5(i, j, o, p)
                Avancement6(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement6(i, j, o, p)
                Avancement7(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement7(i, j, o, p)
                Avancement8(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If

Case 5
If p > 1 Then
    PressBas(i, j, o, p - 1) = Pression
    If TablCell5(i, j, o, p - 1) <> 100 And Avancement5(i, j, o, p - 1) < Avancement5(i, j, o, p) Then
        Avancement5(i, j, o, p - 1) = Avancement5(i, j, o, p) + 1
        Avancement6(i, j, o, p - 1) = Avancement6(i, j, o, p)
        Avancement7(i, j, o, p - 1) = Avancement7(i, j, o, p)
        Avancement8(i, j, o, p - 1) = Avancement8(i, j, o, p)
        Avancement9(i, j, o, p - 1) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j, o, p - 1) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
Else
    If j > 1 Then
        If TablEchant(i, j - 1) = " 2" Then
            PressBas(i, j - 1, o, NbCell) = Pression
            If TablCell5(i, j - 1, o, NbCell) <> 100 And Avancement5(i, j - 1, o, NbCell) < Avancement5(i, j, o, p)
Then
                Avancement5(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement5(i, j, o, p) + 1
                Avancement6(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement6(i, j, o, p)
                Avancement7(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement7(i, j, o, p)
                Avancement8(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If

Case 6
If p > 1 Then
    PressBas(i, j, o, p - 1) = Pression
    If TablCell6(i, j, o, p - 1) <> 100 And Avancement6(i, j, o, p - 1) < Avancement6(i, j, o, p) Then
        Avancement6(i, j, o, p - 1) = Avancement6(i, j, o, p) + 1
        Avancement7(i, j, o, p - 1) = Avancement7(i, j, o, p)

```

```

    Avancement8(i, j, o, p - 1) = Avancement8(i, j, o, p)
    Avancement9(i, j, o, p - 1) = Avancement9(i, j, o, p)
    Avancement10(i, j, o, p - 1) = Avancement10(i, j, o, p)
End If
Else
    If j > 1 Then
        If TablEchant(i, j - 1) = " 2" Then
            PressBas(i, j - 1, o, NbCell) = Pression
            If TablCell6(i, j - 1, o, NbCell) <> 100 And Avancement6(i, j - 1, o, NbCell) < Avancement6(i, j, o, p)
Then
                Avancement6(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement6(i, j, o, p) + 1
                Avancement7(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement7(i, j, o, p)
                Avancement8(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If
End If
Case 7
If p > 1 Then
    PressBas(i, j, o, p - 1) = Pression
    If TablCell7(i, j, o, p - 1) <> 100 And Avancement7(i, j, o, p - 1) < Avancement7(i, j, o, p) Then
        Avancement7(i, j, o, p - 1) = Avancement7(i, j, o, p) + 1
        Avancement8(i, j, o, p - 1) = Avancement8(i, j, o, p)
        Avancement9(i, j, o, p - 1) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j, o, p - 1) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
Else
    If j > 1 Then
        If TablEchant(i, j - 1) = " 2" Then
            PressBas(i, j - 1, o, NbCell) = Pression
            If TablCell7(i, j - 1, o, NbCell) <> 100 And Avancement7(i, j - 1, o, NbCell) < Avancement7(i, j, o, p)
Then
                Avancement7(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement7(i, j, o, p) + 1
                Avancement8(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement8(i, j, o, p)
                Avancement9(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If
Case 8
If p > 1 Then
    PressBas(i, j, o, p - 1) = Pression
    If TablCell8(i, j, o, p - 1) <> 100 And Avancement8(i, j, o, p - 1) < Avancement8(i, j, o, p) Then
        Avancement8(i, j, o, p - 1) = Avancement8(i, j, o, p) + 1
        Avancement9(i, j, o, p - 1) = Avancement9(i, j, o, p)
        Avancement10(i, j, o, p - 1) = Avancement10(i, j, o, p)
    End If
Else
    If j > 1 Then
        If TablEchant(i, j - 1) = " 2" Then
            PressBas(i, j - 1, o, NbCell) = Pression
            If TablCell8(i, j - 1, o, NbCell) <> 100 And Avancement8(i, j - 1, o, NbCell) < Avancement8(i, j, o, p)
Then
                Avancement8(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement8(i, j, o, p) + 1
                Avancement9(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement9(i, j, o, p)
                Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement10(i, j, o, p)
            End If
        End If
    End If
End If
Case 9
If p > 1 Then
    PressBas(i, j, o, p - 1) = Pression

```

```

        If TablCell9(i, j, o, p - 1) <> 100 And Avancement9(i, j, o, p - 1) < Avancement9(i, j, o, p) Then
            Avancement9(i, j, o, p - 1) = Avancement9(i, j, o, p) + 1
            Avancement10(i, j, o, p - 1) = Avancement10(i, j, o, p)
        End If
    Else
        If j > 1 Then
            If TablEchant(i, j - 1) = " 2" Then
                PressBas(i, j - 1, o, NbCell) = Pression
                If TablCell9(i, j - 1, o, NbCell) <> 100 And Avancement9(i, j - 1, o, NbCell) < Avancement9(i, j, o, p)
Then
                    Avancement9(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement9(i, j, o, p) + 1
                    Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement10(i, j, o, p)
                End If
            End If
        End If
    End If
    Case 10
        If p > 1 Then
            PressBas(i, j, o, p - 1) = Pression
            If TablCell10(i, j, o, p - 1) <> 100 And Avancement10(i, j, o, p - 1) < Avancement10(i, j, o, p) Then
                Avancement10(i, j, o, p - 1) = Avancement10(i, j, o, p) + 1
            End If
        Else
            If j > 1 Then
                If TablEchant(i, j - 1) = " 2" Then
                    PressBas(i, j - 1, o, NbCell) = Pression
                    If TablCell10(i, j - 1, o, NbCell) <> 100 And Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) < Avancement10(i, j,
o, p) Then
                        Avancement10(i, j - 1, o, NbCell) = Avancement10(i, j, o, p) + 1
                    End If
                End If
            End If
        End If
    End Select
    PressHaut(i, j, o, p) = Pression
End If
End Sub

' Changement de mode
Private Sub Concentration_Click()
    Front.Checked = False
    Concentration.Checked = True
    Open "Mode.tmp" For Output As #1
    Print #1, "Concentration"
    Close #1
    Teneur20.Caption = "0 - 20 %"
    Teneur40.Caption = "20 - 40 %"
    Teneur60.Caption = "40 - 60 %"
    Teneur80.Caption = "60 - 80 %"
    Teneur100.Caption = "80 - 100 %"
End Sub

' Initialisation du programme au démarrage
Private Sub Form_Load()
    Open "Mode.tmp" For Output As #1
    Print #1, "Front"
    Close #1
    Debut_Simul = True
End Sub

Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    End
End Sub

' Changement de mode
Private Sub Front_Click()

```

```

Front.Checked = True
Concentration.Checked = False
Open "Mode.tmp" For Output As #1
Print #1, "Front"
Close #1
Teneur20.Caption = ""
Teneur40.Caption = ""
Teneur60.Caption = "100 %"
Teneur80.Caption = ""
Teneur100.Caption = ""
End Sub

' Lancement de la procédure de définition de la géométrie de l'échantillon
Private Sub Geometrie_Click()
Echantillon.Show
End Sub

' Lancement de la procédure de définition des paramètres du système
Private Sub Param_Click()
Parametres.Show
End Sub

' On quitte le programme.
Private Sub Quitter_Click()
End
End Sub

```